

Я.С. Паранчук, Ю.В. Шабатура, О.О. Кузнецов

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА НАВЕДЕННЯ ОЗБРОЄННЯ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО ПД-РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕННЯ

Запропоновано позиційну електромеханічну систему наведення озброєння на основі адаптивного нечіткого пропорційно-диференційного (ПД) регулятора положення. Створено структурну Simulink-модель системи позиціонування озброєння на основі нечіткої адаптивної моделі керування. Проведено комп'ютерні дослідження динаміки процесів позиціонування при використанні пропорційного та запропонованого адаптивного нечіткого ПД регулятора положення. Результати досліджень показали, що при використанні нечіткої адаптивної моделі керування процесом позиціонування реалізуються оптимальні без перерегулювання та режимів дотягування закони руху озброєння. Бібл. 20, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: нечіткий регулятор, позиціонування, адаптація, перерегулювання, швидкодія.

Предложено позиционную электромеханическую систему наведения вооружения на основе адаптивного нечеткого пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора положения. Разработано структурную Simulink-модель системы наведения вооружения на основе нечеткой адаптивной модели управления. Проведены компьютерные исследования динамики процессов позиционирования при использовании пропорционального и предложенного адаптивного нечеткого ПД регулятора положения. Результаты исследований показали, что при использовании нечеткой адаптивной модели управления процессом позиционирования реализуются оптимальные без перерегулирования и режимов дотягивания законы движения вооружения. Библ. 20, табл. 1, рис. 12.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, позиционирование, адаптация, перерегулирование, быстродействие.

Вступ. На сучасному етапі розвитку озброєння ракетних військ та артилерії спостерігається тенденція збільшення дальності, підвищення мобільності та точності засобів ураження. Ця тенденція реалізується як при створенні нових високоточних засобів ураження, так і в процесі модернізації існуючих.

Зразки вказаного озброєння, які створені і виготовлені у 70-80 роках минулого століття, не відповідають у повній мірі сучасним вимогам до точності та швидкодії наведення. Причиною цього є недосконалі елементна база, системо- і схемотехніка систем керування вказаного часового періоду, яка на сьогоднішній час переважно є морально застарілою і фізично зношеною.

Зважаючи на це можна стверджувати про актуальність і доцільність спрямування зусиль та фінансів на модернізацію вказаних зразків ракетної техніки у напрямі покращення їх тактико-технічних характеристик [1, 2].

Постановка проблеми. До вказаних зразків ракетного озброєння відносяться, наприклад, реактивні системи залпового вогню на основі бойової машини БМ-21, чи інші. Процес наведення пакету напрямних (ПН) по азимуту і тангажу у цих машинах реалізується ручним приводом чи непозиційною електромеханічною системою (ЕМС) за схемою «електромашинний підсилювач – двигун постійного струму» з використанням відповідних формуючих та стабілізуючих зворотних зв'язків [2].

Вказана ЕМС містить люфти, пружності, зокрема пару торсіонів, зазори та інші нелінійності. Їй властива непостійність моменту інерції та навантаження при різному завантаженні ПН ракетами, а також несиметричність навантаження при різних напрямках руху. Ці фактори негативно впливають на показники динаміки та статички процесу позиціонування ПН у процесі наведення.

Керування рухом пакета напрямних (процесом наведення, позиціонування) в обох площинах в існуючих ЕМС виконується вручну з пульта наведення. Контур регулювання положення відсутній. У такій

системі керування на оперативність та точність наведення озброєння у значній мірі впливає суб'єктивний фактор – кваліфікація оператора (наводчика). Для усунення цього фактора доцільною є автоматизація процесу позиціонування ПН шляхом використання високоточного давача та задавача кута наведення і реалізація автоматичного регулювання кута за сигналом розузгодження. При такому підході усувається вплив суб'єктивного фактора і гарантовано отримуються прогнозовані показники динаміки та статички процесу наведення озброєння, зокрема статична точність позиціонування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що позиційні електроприводи здатні настільки якісно реалізувати бажані закони і траєкторії руху виконавчих механізмів, наскільки якісно буде відтворюватися статична точність та швидкодія позиціонування. Тому завдання отримати найвищу швидкодію регулювання за відсутності режимів перерегулювання та дотягування на «повзучих» швидкодіях і необхідну статичну точність позиціонування можна вважати актуальним та важливим при модернізації та оптимізації електромеханічних систем наведення озброєння по азимуту і тангажу бойової машини БМ-21 [3, 4].

Ефективним системотехнічним підходом для вирішення цього завдання є реалізація електромеханічної системи керування рухом ПН за схемою «широкоімпульсний перетворювач – двигун постійного струму» (ШПП-ДПС) за підпорядкованим принципом керування з використанням внутрішніх контурів регулювання струму (моменту) та швидкості двигуна і їх стандартним налаштуванням на модульний оптимум та додатково уведеного зовнішнього контуру регулювання положення [5, 6].

Класичним підходом при побудові позиційних систем автоматичного керування (САК) є використання пропорційного (П) регулятора положення (РП) [3-7]. Така структура САК дає змогу отримувати бажані показники динаміки позиціонування у режимах

© Я.С. Паранчук, Ю.В. Шабатура, О.О. Кузнецов

великих переміщень при реалізації трапецеподібної тахограми руху електропривода.

Але при відпрацюванні завдань на менші переміщення, які виконуються на нижчих швидкостях, процеси позиціонування супроводжуються режимами дотягування, тривалість яких є співвимірною з часом гальмування при відпрацюванні великих переміщень [8]. Для усунення цих режимів використовують параболічний РП, який найчастіше включається в контур регулювання положення триконтурної системи підпорядкованого керування з внутрішніми контурами регулювання струму та швидкості з ПІ- та ПІ-регуляторами відповідно і стандартними їх налаштуваннями [8].

Прогнозована динаміка процесу позиціонування у вказаних вище структурах досягається за умови незмінних моменту навантаження, початкового положення, моменту інерції та інших параметрів. При недотриманні цих умов динаміка руху виконавчого органу буде відхилитися від оптимальної, що відповідає вибраній структурі САК та принципу налаштуванням регуляторів координат.

Для усунення негативного впливу на оптимальні закони руху вказаних вище координатних та параметричних збурень в сучасних моделях керування та при неповній інформації про стан об'єкта керування використовують інтелектуальні підходи, які ґрунтуються, зокрема, на алгоритмах нечіткої логіки [9-13]. Такі моделі керування використовуються в позиційних САК, у тому числі і для задач оптимізації та адаптації керування у режимах позиціонування та стеження в умовах дії координатних та параметричних збурень.

Відомо, що класичні пропорційно-диференціальні (ПД) регулятори добре вирізняються своїми властивостями покращення якості перехідних процесів, зокрема в позиційних системах у режимах позиціонування та стеження. У роботах [13-15] показано, що нечіткі ПД-регулятори та нечіткі пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори забезпечують значне підвищення якості динаміки систем, зокрема позиційних, порівняно з використанням класичних ПІД-регуляторів і особливо у випадках, коли в об'єкті керування є різного роду нелінійності та параметричні невизначеності.

Основна перевага та особливість нечіткого керування полягає у можливості ефективного його використання у системах із складним математичним описом та параметричними і координатними флуктуаціями, наявними невизначеностями, пружностями, нелінійностями, люфтами, зазорами тощо.

Крім того, як показано у [14-18], переваги нечітких регуляторів полягають у їх простоті, а також низькій чутливості до параметричних змін та невизначеностей в об'єкті керування завдяки механізму оперативного опрацювання інформації на основі моделей нечіткого логічного виводу. Вказані особливості є властиві механізму наведення озброєння БМ-21. Це додатково аргументує доцільність використання моделей нечіткого керування для покращення показників динаміки та статички процесів позиціонування ПН.

Метою статті є розроблення структури та дослідження ефективності використання адаптивного нечіткого ПД-регулятора положення для підвищення

точності та оперативності наведення озброєння шляхом реалізації оптимальних законів руху пакету напрямних на повному діапазоні регулювання положення в структурі позиційної триконтурної ЕМС наведення пакету напрямних бойової машини при її модернізації.

Тому завдання розроблення системотехнічних рішень з метою реалізації точного позиціонування ПН БМ-21 без перерегулювання та режимів дотягування в умовах дії вказаних збурень та параметричних змін для системи вертикального наведення ПН є актуальним та важливим.

На сучасному етапі розвитку ЕМС спостерігається тенденція широкого застосування для задач автоматичного регулювання координат та оптимального керування режимами методів теорії штучного інтелекту, складовою якої є трансформації типових пропорційно-інтегрального, пропорційно-диференціального та пропорційно-інтегрально-диференціального законів керування на їх fuzzy чи нейронечіткі версії [13-20].

Об'єкт керування розглядуваної ЕМС – механізм вертикального наведення ПН, відноситься до класу складних систем, оскільки він містить нелінійні елементи, невизначеності, механічні ланки з люфтами, запізненням, з обмеженою жорсткістю, параметри яких, окрім того, не є сталими і змінюються у процесі в наведення та залежать від рівня завантаження ракетами ПН та інших чинників. Зважаючи на це, для контуру регулювання положення розглядуваної ЕМС використаємо нечіткий варіант пропорційно-диференційного РП, що апріорно надає контур регулювання положення адаптивні, інваріантні до дії параметричних збурень, властивості. Іншими словами, використання нечіткого ПД-регулятора положення повинно забезпечити реалізацію бажаних оптимальних без перерегулювання та режимів дотягування при максимальній швидкодії законів руху ПН на повному діапазоні регулювання положень в просторі дії реальних параметричних змін та координатних збурень.

Для вказаної мети використаємо загальну структуру нечіткого регулятора (НР), на основі якого можна отримувати різні варіанти нечітких пропорційно-диференційних регуляторів прямої дії. У якості вхідних сигналів НР приймемо похибку регулювання кута наведення $e(t) = \varphi_{ref}(t) - \varphi(t)$ і її похідну $de(t)/dt \cong (e(t_i) - e(t_{i-1})) / (t_i - t_{i-1})$ – швидкість зміни похибки. Зважаючи на те, що на тепер вказані регулятори в структурах САК реалізують на цифровій елементній базі (мікроконтролерах), то його математичну модель подамо у дискретній формі. За такого підходу похідна сигналу похибки на вході НР подається скінченими приростами.

Математична модель класичного аналогового ПД-регулятора подається наступним рівнянням:

$$u(t) = k_r [e(t) + T_d \cdot de(t)/dt], \quad (1)$$

де $e(t)$, $u(t)$ – вхідний та вихідний сигнал, k_r , T_d – коефіцієнт передачі та стала диференціювання ПД-регулятора, відповідно.

Перехід в (1) до дискретного часу дає змогу отримати математичну модель ПД-регулятора для його цифрової реалізації:

$$u(k) = k_r \left[\frac{T_d}{T_0} \cdot \Delta e(k) + e(k) \right], \quad (2)$$

де T_0 – інтервал квантування за часом; $k = 1, 2, 3, \dots$ – номер кроку дискретизації за часом; $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$.

Основною вимогою, що ставиться до позиційної ЕМС наведення ПН на заданий кут φ_{ref} , є реалізація оптимальних законів руху напрямних у процесі позиціонування (без перегулювання та режимів дотягування) при максимальній швидкодії на повному діапазоні регулювання положень при дії реальних координатних і параметричних збурень.

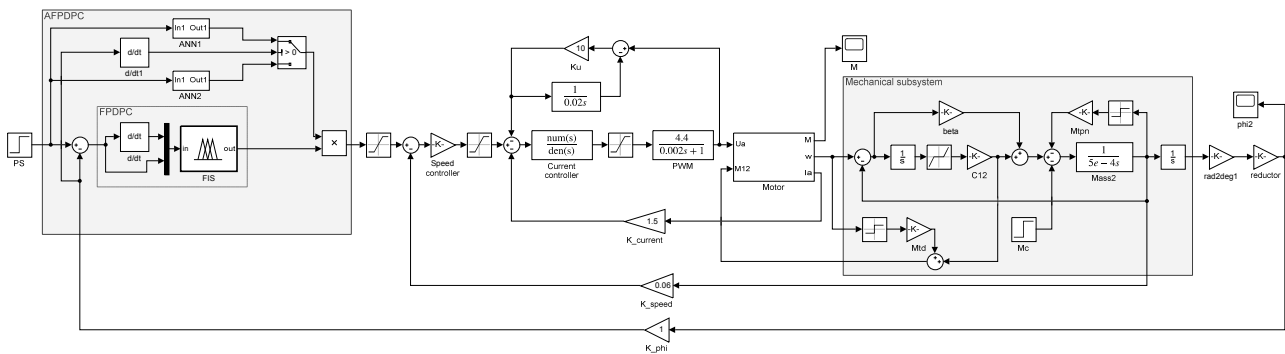


Рис. 1. Структурна схема ЕМС вертикального наведення ПН з нечітким ПД-регулятором положення

Для дослідження показників динаміки та статички процесу наведення ПН запропонованої позиційної ЕМС створено її структурну модель в додатку Simulink програми Matlab з варіантом використання для можливості порівняння показників динаміки класичного пропорційного і запропонованого адаптивного нечіткого пропорційно-диференційного регулятора в контурі регулювання положення.

Тестування складеної триконтурної позиційної з названим вище підпорядкованим регулюванням координат ЕМС наведення ПН виконано при використанні в контурі регулювання положення класичного пропорційного регулятора з налаштування його на модульний оптимум.

На рис. 2 показано отримані на цій моделі часові залежності регулювання кута наведення для трьох кутів позиціонування: 17° , 35° та 60° . П-регулятор положення налаштований на оптимальну динаміку (оптимальний закон руху) для кута позиціонування $\varphi_{ref} = 35^\circ$ з коефіцієнтом передачі $k_{pn} = 2.11$. При позиціонуванні на інші кути наведення спостерігаються перегулювання та режими дотягування.

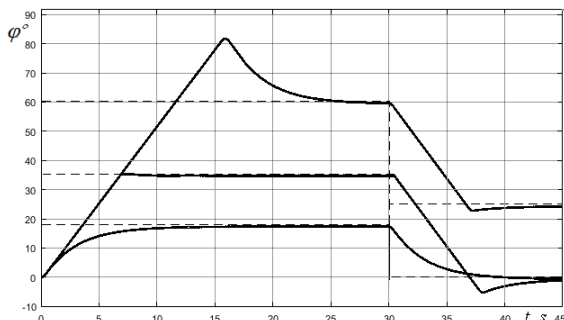


Рис. 2. Реакції $\varphi(t)$ ЕМС на стрибкоподібні сигнали керування з пропорційним РП при початковому встановленні ПН на кути 17° , 35° та 60° і наступним – на 0° , 0° та 35° відповідно

Значення максимальної швидкості, прискорення та напруги ШПП в запропонованій позиційній ЕМС наведення ПН приймаємо такими ж, як і в реальній існуючій системі надання руху ПН бойової машини БМ-21.

Структура позиційної ЕМС. Структурна схема запропонованої триконтурної позиційної ЕМС наведення ПН бойової машини БМ-21 з адаптивним нечітким ПД-регулятором положення показана на рис. 1. Електропривод такої ЕМС реалізовано за реверсивний схемою ШПП-ДПС. Регулятор внутрішнього контуру струму пропорційно-інтегральний, а контуру швидкості – пропорційний.

Синтез нечіткого ПД регулятора. Синтез нечіткого ПД регулятора та стратегії нечіткого керування положенням ПН ґрунтувався на використанні емпірично набутих знань про конструкцію, особливості керування, збурення та показники режимів позиціонування ПН БМ-21.

Систему нечіткого виведення (FIS – fuzzy inference system) (рис. 1) ПД-регулятора положення представлено моделлю Mamdani, яка має два входи: для пропорційної $x_1 = e(t)$ та диференційної $x_2 = de(t)/dt$ складових, де $e(t)$ – похибка регулювання кута $e(t) = \varphi_{ref}(t) - \varphi(t)$ (де $\varphi_{ref}(t)$, $\varphi(t)$ – сигнали заданого та поточного кута позиціонування ПН відповідно).

Для лінгвістичного опису входних змінних x_1 та x_2 прийнято два трапецієподібні зовнішні (N, P) і один трикутний внутрішній терм (Z) із симетричними діапазонами зміни (рис. 3).

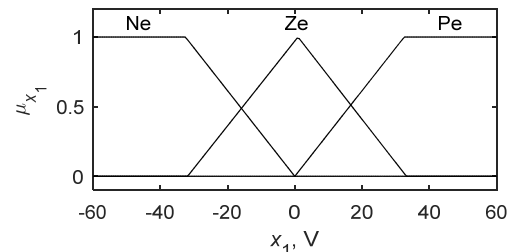


Рис. 3. Функції приналежності входних змінних x_1 та x_2 FIS

Для лінгвістичного опису вихідної лінгвістичної змінної FIS U_{FIS} , що подає сигнал керування регулятора швидкості $U_{c,\omega} = U_{FIS}$, прийнято два трапецієподібні зовнішні (Nu, Pu) і один трикутний внутрішній терм (Zu) із симетричними діапазонами зміни (рис. 4).

Функціональний зв'язок між сигналом завдання кута φ_{ref} і вихідним сигналом FIS U_{FIS} , що є сигналом завдання $U_{c,\omega}$ П-регулятора швидкості у такій стратегії керування подається в лінгвістичній формі, а саме сукупністю нечітких правил типу (IF...AND...THEN).

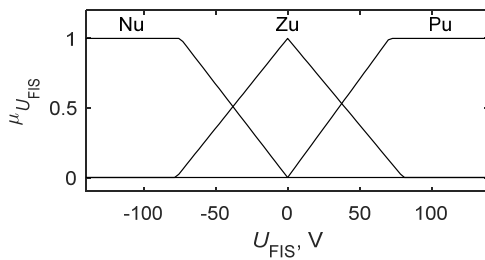


Рис. 4. Функції приналежності вихідної змінної U_{FIS} FIS

Базу правил FIS сформовано на основі аналізу зміни похибки регулювання положення $e(t) = \varphi_{ref}(t) - \varphi(t)$, її похідної $de(t)/dt$ та поточного кута положення ПН $\varphi(t)$. База правил формувалася на основі співставленні часових залежностей зміни бажаної та фактичної (при пропорційному РП) реакцій ЕМС при позиціонуванні ПН на кут $\varphi_{ref} = 35^\circ$. Бажана реакція відповідала оптимальному закону руху – позиціонування при максимальній швидкодії і зупинці без перерегулювання та режиму дотягування. Оптимальний коефіцієнт передачі П-регулятора положення розраховувався за умовою модульного оптимуму.

Складена база правил та інші параметричні та алгоритмічні степені свободи нечіткого ПД-регулятора уточнялися за результатами математичних експериментів на складеній Simulink-моделі розробленої позиційної САК (рис. 1) за значенням варіанта інтегрального показника якості (T – час регулювання)

$$I = \int_0^T t e(t)^2 dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

Отримана база правил нечіткого ПД-регулятора положення показана у табл. 1.

База правил FIS

		Похибка регулювання – x_1		
		Ne	Ze	Pe
Похідна похибки регулювання – x_2	Nde	N	Z	Z
	Zde	N	Z	P
	Pde	Z	Z	P

Таблиця 1

На рис. 5 показано 3D поверхню вихідного сигналу спроектованого нечіткого ПД-регулятора положення на площині зміни вхідних лінгвістичних змінних x_1 та x_2 спроектованої FIS.

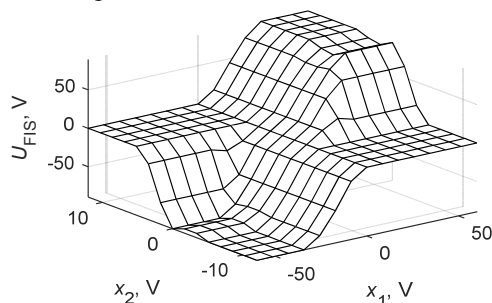


Рис. 5. Характеристика вхід/вихід $U_{FIS}(x_1, x_2)$ спроектованого нечіткого ПД-регулятора положення

Дослідження позиційної ЕМС. Отримані реакції ЕМС із спроектованим нечітким ПД-регулятором положення при відпрацюванні сигналів керування на

мале ($\varphi_{ref} = 15^\circ$ та 0°), середнє ($\varphi_{ref} = 35^\circ$ та 0°) та велике ($\varphi_{ref} = 60^\circ$ та 0°) переміщення ПН показано на рис. 6.

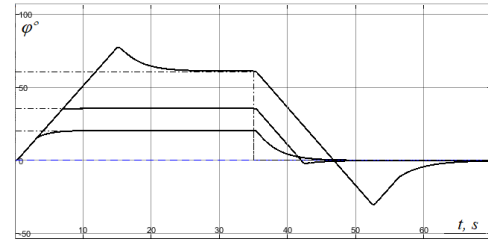


Рис. 6. Реакції ЕМС із нечітким ПД-регулятором положення

У порівнянні з П-регулятором (рис. 2), при використанні нечіткого ПД-регулятора положення перерегулювання і часу регулювання є меншими.

Але досягнути повної інваріантності показників динаміки та статички позиціонування до значення сигналу керування (до величини переміщення), тобто отримати оптимальні закони руху ПН для будь-яких кутів позиціонування лише зміною параметричних та алгоритмічних степенів свободи спроектованої FIS Mamdani (нечіткого ПД-регулятора положення) – не вдалося.

Тому, для отримання оптимальних законів руху при позиціонуванні ПН на будь-які кути без перерегулювання та режимів дотягування при максимально можливій швидкодії запропоновано використовувати адаптацію моделі нечіткого ПД-регулятора положення до зміни сигналу керування $\varphi_{ref}(t)$. Адаптацію запропоновано виконувати шляхом нормування вихідного сигналу нечіткого ПД-регулятора:

$$U_{FIS}^n = k_n(\varphi_{ref}) \cdot U_{FIS} = U_{c.\omega}, \quad (4)$$

де U_{FIS}^n – нормований вихідний сигнал нечіткого ПД-регулятора положення, що є сигналом керування регулятора швидкості $U_{c.\omega}$ позиційної ЕМС надання руху ПН; $k_n(\varphi_{ref})$ – залежність нормуючого коефіцієнта.

Для отримання нормуючої функціональної залежності $k_n(\varphi_{ref})$ на Simulink-моделі виконано серію математичних експериментів. Для різних допустимих сигналів завдання φ_{ref} положення ПН визначалося значення нормуючого коефіцієнта k_n , при якому отримувалася оптимальний закон руху ПН.

Аналіз результатів дослідження показав, що ця залежність є несиметричною відносно середнього кута позиціонування 35° і різною у режимах підняття та опускання ПН (для $\varphi_{ref} = 35^\circ$ $k_n = 1$). Пояснюється це активним характером моменту навантаження, реактивним моментом тертя, різною дією торсіонів тощо. Ці фактори по різному впливають на показники динаміки руху при підніманні та опусканні ПН. Отримані залежності $k_n(\varphi_{ref})$ при підніманні (\rightarrow) та опусканні (\leftarrow) ПН показано на рис. 7.

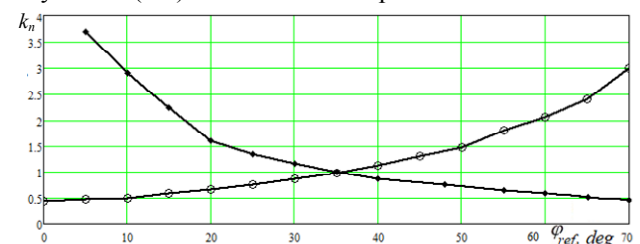


Рис. 7. Залежності нормуючого коефіцієнта $k_n(\varphi_{ref})$ вихідного сигналу FIS для руху ПН вгору (\rightarrow) і вниз (\leftarrow)

Відтворюються ці залежності в структурі такого адаптивного нечіткого ПД-регулятора положення (АНПДРП – англ. AFPDPC) двома штучними нейронними мережами (ANN1 та ANN2, рис. 8 та рис. 1) прямого поширення сигналу чи іншими статичними нелінійними функціональними перетворювачами.

На рис. 8 наведено функціональну схему запропонованого AFPDPC пакету напрямних, де позначено: PS – задавач положення, FPDPC – нечіткий пропорційно-диференційний регулятор положення, Plant – об'єкт керування.

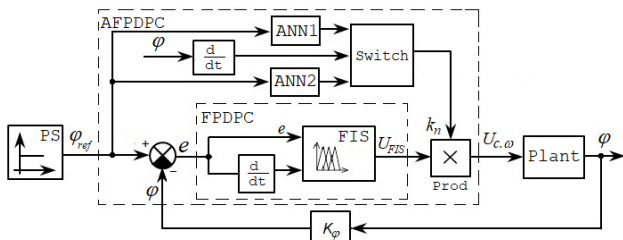


Рис. 8. Структурна схема адаптивного нечіткого ПД-регулятора положення ЕМС наведення ПН

Перемикання між вітками вгору/вниз залежності коефіцієнта адаптації $k_n(\varphi_{ref})$ в структурі АНПДРП виконується у функції зміни швидкості (знаку прискорення), що реалізується в перемикачі Switch (рис. 8). На виході перемикача Switch формується поточне значення нормуючого коефіцієнта k_n , яке поступає на вхід елемента множення Prod, на виході якого формується сигнал задання швидкості $U_{c,\omega}$ згідно (4).

Отримана структурна модель АНПДРП імплементована у структуру Simulink-моделі позиційної ЕМС наведення ПН (рис. 1).

На рис. 9 та рис. 10 показано отримані на цій моделі часові залежності кута наведення $\varphi(t)$ при відпрацюванні двох програм дискретної зміни сигналу керування $\varphi_{ref}(t)$ положення ПН (.....) при функціонуванні запропонованого АНПДРП (—) і, для порівняння, пропорційного РП (- - -).

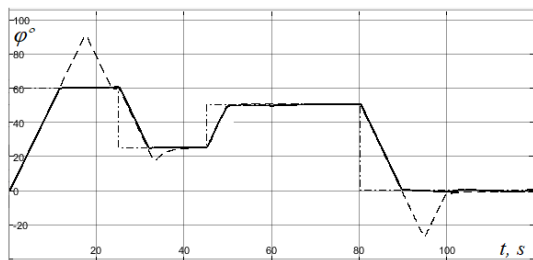


Рис. 9. Часові залежності $\varphi(t)$ при позиціонуванні ПН на кути 60°, 25°, 50°, та 0° при пропорційному РП (----) і АНПДРП (—), (.....) – сигнал задання положення

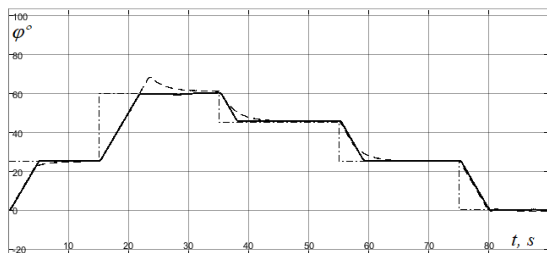


Рис. 10. Часові залежності $\varphi(t)$ при позиціонуванні ПН на кути 25°, 60°, 45°, 25° і 0° при пропорційному РП (----) і АНПДРП (—), (.....) – сигнал задання положення

За першою програмою ПН почергово встановлювався на кути $\varphi_{ref} = 60^\circ, 25^\circ, 50^\circ$ і 0° , (рис. 10), а за другою – $\varphi_{ref} = 25^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 25^\circ$ і 0° (рис. 11). Ці часові залежності $\varphi(t)$ процесу позиціонування ПН отримані при їх завантаженні ракетами на 50 %.

Значення прийнятого показника якості (3) при роботі П-регулятора положення склало 4,15 град²·с, а при АНПДРП – 3,72 рад²·с (рис. 9, перша програма) і 3,91 град²·с та 3,69 град²·с відповідно для другої програми (рис. 10). Покращання показника якості при використанні АНПДРП склало 10,4 % і 5,6 % для першої та другої програми зміни $\varphi_{ref}(t)$ відповідно.

Порівняльний аналіз отриманих часових залежностей $\varphi(t)$ для дискретного (одиночного) характеру зміни $\varphi_{ref}(t)$ показує покращення показників якості динаміки при функціонуванні запропонованого АНПДРП при позиціонуванні ПН на різні кути наведення незалежно від напрямку руху (піднімання чи опускання) до точки встановлення у порівнянні з використанням класичного П-регулятора в контурі положення ЕМС наведення ПН.

Для отримання повнішої оцінки динаміки синтезованої позиційної ЕМС надання руху ПН з АНПДРП, досліджено процеси наведення $\varphi(t)$ при синусоїдній зміні сигналу задання положення $\varphi_{ref}(t)$ (цей режим роботи не є типовим для механізму наведення ПН). Отримані залежності $\varphi(t)$ показано на рис. 11.

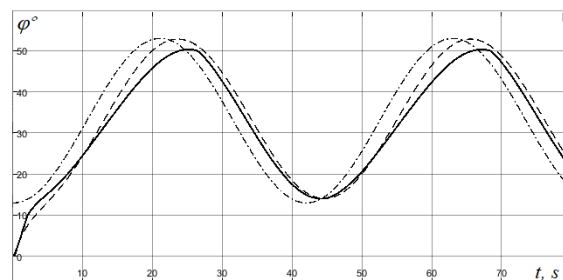


Рис. 11. Часові залежності $\varphi(t)$ відпрацювання синусоїдного сигналу задання $\varphi_{ref}(t)$ (.....) при пропорційному РП (----) і АНПДРП (—)

Основними збурення, що впливають на динаміку руху ПН в запропонованій позиційній ЕМС наведення, є момент статичного навантаження та момент інерції механізму наведення ПН, які змінюються при різному їх завантаженні ракетами.

На рис. 12 показано отримані на моделі процеси $\varphi(t)$ при позиціонуванні ПН на кут 35° з наступним встановленням у початкове положення 0° при 50 % завантаженні (рис. 12,а) і при повному завантаженні (рис. 12,б) при функціонуванні пропорційного РП та запропонованого АНПДРП, які ілюструють параметричну чутливість ЕМС наведення ПН з цими РП.

Аналіз отриманих процесів позиціонування $\varphi(t)$ показує нижчу чутливість ЕМС з АНПДРП у порівнянні з класичним пропорційним РП.

Висновки.

1. Обґрунтовано доцільність використання нечітких моделей керування для покращення показників динаміки та статички процесу наведення ПН.

2. Розроблено структуру та виконано проектування нечіткого пропорційно-диференційного РП з адаптацією до сигналу задання положення.

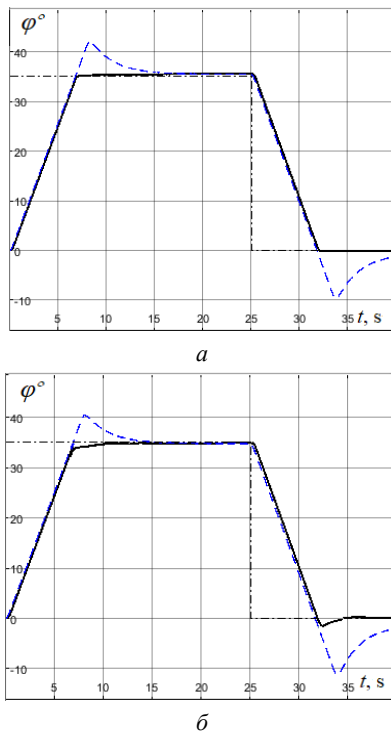


Рис. 12. Часові залежності $\varphi(t)$ при позиціонуванні ПН на кут 35° та 0° при пропорційному РП (----) та АНПДРП (—) для 50 % (а) та 100 % (б) завантаження ПН, (---) – сигнал задання положення

3. Створено структурну модель розробленої позиційної ЕМС наведення озброєння БМ-21 і виконано її реалізацію у додатку Simulink програми Matlab.

4. Виконано комп'ютерні дослідження показників динаміки руху ПН при встановленні озброєння на різні кути наведення, різному характері $\varphi_{ref}(t)$ та при різних завантаженнях пакета напрямних.

5. Отримані результати комп'ютерних досліджень показали, що при використанні спроектованого адаптивного нечіткого ПД-регулятора положення реалізуються оптимальні без перерегулювання та режимів дотягування і з максимальною швидкістю закони руху пакетів напрямних на повному діапазоні зміни кутів наведення і при різних завантаженнях ПН.

6. При використанні розроблених системотехнічних рішень для контуру регулювання положення ЕМС наведення озброєння БМ-21 досягається високий рівень робастності показників динаміки до зміни моменту статичного навантаження та моменту інерції механізму наведення пакета напрямних.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крайник Л.В., Врубель М.Г., Яльніцький О.Д. Аналіз розвитку сучасних бойових машин. *Системи озброєння і військова техніка*, 2017, № 1 (49), с. 126-131. Режим доступу: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/17585/eng> (Дата звернення: 25.12.2020).
2. Боевая машина БМ-21. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: Воениздат, 1982. – 99 с.
3. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdvi I.V. Improving of electromechanical servo systems accuracy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 33-37. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.04>.

4. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V., Kobilyanskiy B.B. Improving of electromechanical stabilization systems accuracy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 2, pp. 21-27. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.2.04>.
5. Паранчук Я.С., Чумакевич В.О., Євдокімов П.М., Москалик В.О. Швидкодійна електромеханічна система наведення та стабілізації на основі широтно-імпульсного перетворювача з нечітким керуванням. *Матеріали МНТК «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах»*, Севастополь, 2013, с. 71-72.
6. Paranchuk Y., Evdokimov P., Kuznyetsov O. Electromechanical positioning system with a neuro-fuzzy corrector. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2020, no. 9, pp. 52-55. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2020.09.11>.
7. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. *Теория автоматизированного электропривода*. М.: Энергия, 1979. – 616 с.
8. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. *Управление вентиляными электроприводами постоянного тока*. М.: Энергия, 1970. – 200 с.
9. De Azevedo H. R., Branodao S. F. M., Da Mota Alves J. V. A fuzzy logic controller for DC motor position control. *Proceedings of IEEE 2nd International Workshop on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA '93)*, 1993, pp. 18-27. doi: <https://doi.org/10.1109/etfa.1993.396433>.
10. Manikandan R., Arulmozhiyal R. Position control of DC servo drive using fuzzy logic controller. *2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, 2014, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/icaee.2014.6838474>.
11. Приймак Б.І., Бондаренко М.М., Холімовський О.М. Нечітке керування електромеханічними об'єктами. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода»*, 2007, с. 308-311.
12. Лукичев Д.В., Демидова Г.Л. Нечеткая система управления электроприводом опорно-поворотных устройств с нежесткими осями. *Вестник ИГЭУ*, 2013, № 6, с. 60-64. Режим доступу: http://vestnik.ispu.ru/sites/vestnik.ispu.ru/files/publications/str.60-64_0.pdf (Дата звернення: 25.12.2020).
13. Paranchuk Y., Matsyhin A. The system of arc lengths regulation of an electric arc furnace with a neuro-controller, *Przeglad Elektrotechniczny*, 2013, vol. 89, no. 3A, pp. 271-273. Режим доступу: <http://pe.org.pl/articles/2013/3a/58.pdf> (Дата звернення: 25.12.2020).
14. Ying H. *Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications*, IEEE press, 2000. – 342 p. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5263877> (Дата звернення: 25.12.2020).
15. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Paranchuk R. Fuzzy control law of electrode travel in arc steelmaking furnace. *2015 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2015, pp. 103-106. doi: <https://doi.org/10.1109/cpee.2015.7333349>.
16. Mendel J. M., John R. I. B. Type-2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, vol. 10, no. 2, pp. 117-127. doi: <https://doi.org/10.1109/91.995115>.
17. Paranchuk Ya.S., Paranchuk R.Ya. Neural Network System for Continuous Voltage Monitoring in Electric Arc Furnace. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2016, iss. 2, pp. 74-80. Режим доступу: <http://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-divisions-of-science/electrical-engineering/3398-neutral-network-system-for-continuous-voltage-monitoring-in-electric-arc-furnace> (Дата звернення: 25.12.2020).
18. Paranchuk Y.S., Paranchuk R.Y. Research of arc furnace electrical mode with a fuzzy control model. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 30-36. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.05>.
19. Begian M.B., Melek W.W., Mendel J.M. Stability analysis of type-2 fuzzy systems. *2008 IEEE International Conference on Fuzzy*

Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 2008, pp. 947-953. doi: <https://doi.org/10.1109/fuzzy.2008.4630483>.

20. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Kobylanskyi O. Simulink model of electric modes in electric arc furnace. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), 2017, pp. 54-57. doi: <https://doi.org/10.1109/ysf.2017.8126591>.

REFERENCES

1. Krainyk L.V., Hrubel M.H., Yalmytskyi O.D. Analysis of development of the modern fighting wheeled machines. *Systems of Arms and Military Equipment*, 2017, no. 1 (49), pp. 126-131. Available at: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/17585/eng> (accessed 12 October 2020). (Ukr).
2. *BM-21 Combat Vehicle. Technical description and operating instructions*. Moscow, Voenizdat Publ., 1982. 99 p. (Rus).
3. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdii I.V. Improving of electromechanical servo systems accuracy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 33-37. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.04>.
4. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdii I.V., Kobylanskyi B.B. Improving of electromechanical stabilization systems accuracy. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 2, pp. 21-27. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.2.04>.
5. Paranchuk Ya.S., Chumakevych V.O., Evdokimov P.M., Moskalyk V.O. High-speed electromechanical guidance and stabilization system based on pulse-width converter with fuzzy control. *Proceedings of International Scientific and Technical Conference «Problems of Enhancing the Energy Efficiency of the Electromechanical Converters in Electrical Energy Systems»*, Sevastopol, Ukraine, 2013, pp. 71-72. (Ukr).
6. Paranchuk Y., Evdokimov P., Kuznyetsov O. Electromechanical positioning system with a neuro-fuzzy corrector. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 2020, no. 9, pp. 52-55. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2020.09.11>.
7. Chilikin M.G., Klyuchev V.I., Sandler A.S. *Theory of Automated Electric Drives*. Moscow, Energiya Publ., 1979. 616 p. (Rus).
8. Lebedev Ye.D., Neimark V.Ye., Pistrak M.Ya., Slezhanovskiy O.V. *Control of DC Electric Drives with Semiconductor Converters*. Moscow, Energiya Publ., 1970. 200 p. (Rus).
9. De Azevedo H. R., Branodao S. F. M., Da Mota Alves J. B. A fuzzy logic controller for DC motor position control. *Proceedings of IEEE 2nd International Workshop on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA '93)*, 1993, pp. 18-27. doi: <https://doi.org/10.1109/etfa.1993.396433>.
10. Manikandan R., Arulmozhiyal R. Position control of DC servo drive using fuzzy logic controller. 2014 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2014, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/icaee.2014.6838474>.
11. Priymak B.I., Bondarenko M.M., Khalimovsky O.M. Fuzzy control of electromechanical objects. *Bulletin of Scientific Works of Dniprodzerzhynsk State Technical University. Special Issue «Problems of Automated Electric Drive»*, 2007, pp. 308-311. (Ukr).
12. Lukichev D.V., Demidova G.L. Fuzzy control system of positioning servo drives of elastic coupling rotary supports, *Vestnik IGEU*, 2013, no. 6, pp. 60-64. Available at: http://vestnik.ispu.ru/sites/vestnik.ispu.ru/files/publications/str.60-64_0.pdf (accessed 12 October 2020). (Rus).
13. Paranchuk Y., Matsyhin A. The system of arc lengths regulation of an electric arc furnace with a neuro-controller, *Przeegląd Elektrotechniczny*, 2013, vol. 89, no. 3A, pp. 271-273. Available at: <http://pe.org.pl/articles/2013/3a/58.pdf> (accessed 12 October 2020).
14. Ying H. *Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications*, IEEE press, 2000. 342 p. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5263877> (accessed 12 October 2020).
15. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Paranchuk R. Fuzzy control law of electrode travel in arc steelmaking furnace. 2015 16th International Conference on Computational Problems of Elec-

trical Engineering (CPEE), 2015, pp. 103-106. doi: <https://doi.org/10.1109/cpee.2015.7333349>.

16. Mendel J. M., John R. I. B. Type-2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, vol. 10, no. 2, pp. 117-127. doi: <https://doi.org/10.1109/91.995115>.
17. Paranchuk Ya.S., Paranchuk R.Ya. Neural Network System for Continuous Voltage Monitoring in Electric Arc Furnace. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2016, iss. 2, pp. 74-80. Available at: <http://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-divisions-of-science/electrical-engineering/3398-neutral-network-system-for-continuous-voltage-monitoring-in-electric-arc-furnace> (accessed 12 October 2020).
18. Paranchuk Y.S., Paranchuk R.Y. Research of arc furnace electrical mode with a fuzzy control model. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 30-36. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.05>.
19. Begian M.B., Melek W.W., Mendel J.M. Stability analysis of type-2 fuzzy systems. 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 2008, pp. 947-953. doi: <https://doi.org/10.1109/fuzzy.2008.4630483>.
20. Lozynskyy O., Paranchuk Y., Kobylanskyi O. Simulink model of electric modes in electric arc furnace. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), 2017, pp. 54-57. doi: <https://doi.org/10.1109/ysf.2017.8126591>.

Надійшла (Received) 05.04.2021

Прийнята (Accepted) 09.05.2021

Опублікована (Published) 25.06.2021

Паранчук Ярослав Степанович¹, д.т.н., проф.,
Шабатура Юрій Васильович², д.т.н., проф.,
Кузнєцов Олексій Олександрович², к.т.н., доц.,

¹ Національний університет «Львівська політехніка»,
79013, Львів, вул. С. Бандери, 12,
e-mail: uparanchuk@yachoo.com

² Національна академія сухопутних військ
імені гетьмана П. Сагайдачного,
79026, Львів, вул. Героїв Майдану, 32,
e-mail: shabaturayuriy@gmail.com,
oleksiy.kuznyetsov@ukr.net (Corresponding author)

Ya.S. Paranchuk¹, Y.V. Shabatura², O.O. Kuznyetsov²

¹ Lviv Polytechnic National University,
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine.

² Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy,
32, Heroes of Maidan Str., Lviv, 79026, Ukraine.

Electromechanical guidance system based on a fuzzy proportional-plus-differential position controller.

Purpose. The purpose is to develop solutions for the implementation of optimal laws of arms positioning, overshoot-free and requiring no post-adjustments. **Method.** The control model is based on the fuzzy set theory; and the structural modeling methodology is used to study the dynamics indices. **Results.** The structural scheme of the positional electromechanical system with a fuzzy proportional-plus-differential position controller and the method of control adaptation to the position reference signal change are obtained. **Scientific novelty.** A model of a fuzzy proportional-differential controller signal adaptation in the structure of a positional electromechanical system is proposed. **Practical value.** A solution is obtained for the implementation of optimal guidance process, non-overshooting and requiring no post-adjustments, also featuring the maximum weapons speed and minimal sensitivity to parametric disturbances. References 20, tables 1, figures 12.

Key words: fuzzy controller, positioning, adaptation, overshoot, speed.