

## КОМБІНОВАНЕ КЕРУВАННЯ БЕЗРЕДУКТОРНИМ ДУГОСТАТОРНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ АНТЕНИ СУДНОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ ШВИДКОСТІ

**В.П. Стяжкін**<sup>1\*</sup>, канд.техн.наук, **О.А. Зайченко**<sup>1\*\*</sup>, канд.техн.наук,  
**С.І. Гаврилюк**<sup>1\*\*\*</sup>, канд.техн.наук, **О.М. Рижков**<sup>1\*\*\*\*</sup>, докт. філ., **В.І. Теряєв**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд.техн.наук,  
**Н.Д. Красношاپка**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, канд.техн.наук

<sup>1</sup> Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [tems@ukr.net](mailto:tems@ukr.net); [serggtm@gmail.com](mailto:serggtm@gmail.com).

<sup>2</sup> НТУ України “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: [kpivot@gmail.com](mailto:kpivot@gmail.com); [n.krasnoshapka@gmail.com](mailto:n.krasnoshapka@gmail.com).

*Проведено синтез нечіткого пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора швидкості дугостаторного електроприводу обертання антени радіолокаційної станції з комбінованим керуванням. Розроблено структурну схему нечіткого регулятора, визначено вхідні та вихідні лінгвістичні змінні, складено базу правил, отримано поверхні залежності вихідної змінної керування від вхідних координат. Побудовано імітаційну модель електроприводу в системі Matlab з синтезованим нечітким логічним регулятором на основі двофазної моделі асинхронного дугостаторного двигуна. Проведено моделювання номінального та найбільш важкого режимів роботи електроприводу, отримано графіки перехідних процесів, які підтверджують його працездатність навіть в умовах граничних навантажень. Бібл. 9, рис. 7, табл. 1.*

**Ключові слова:** пропорційно-інтегрально-диференціальний нечіткий регулятор, суднова антена радіолокаційної станції, безредукторний дугостаторний електропривод, комбінована система автоматичного керування.

**Вступ.** З огляду на стрімке зростання світового флоту сучасні судна обладнуються більш якісними та складними радіонавігаційними системами і комплексами, за допомогою яких вирішуються питання безпеки плавання та зв'язку. Навігаційні радіолокаційні станції (РЛС) забезпечують визначення місця судна за орієнтирами, розпізнавання берегової лінії, орієнтування в умовах обмеженого простору, виявлення зустрічних суден та безпечно розходження з ними. Однією із основних вимог до навігаційних суднових станцій є робота в секторному режимі (робочому секторі, де відбувається радіолокація, та неробочому секторі, де її немає). Система автоматичного керування електроприводом антенного поста навігаційних суднових станцій повинна забезпечити максимальну точність відпрацювання заданого графіку швидкості у разі переходу від неробочого до робочого сектора в умовах змінного вітрового навантаження та забезпечити перехідний процес з величиною перерегулювання, що не перевищує значення технічних вимог.

В роботі розглядається можливість модернізації існуючого електроприводу антени суднової РЛС типу «МІУС», що встановлені на багатьох суднах не тільки України, а і інших країн світу. Час виходу на задану швидкість обертання таких антен, тобто час перехідного процесу, повинен складати 0.8 – 1.0 с, а величина перерегулювання швидкості не повинна перевищувати 5-8 % згідно технічних вимог до електроприводів антен даного типу [1].

Значна кількість сучасних робіт присвячена системам керування, побудованим на базі нечіткої логіки, в тому числі в області морської інженерії. В [2] розглядається нечіткий логічний контролер для зменшення хитаючи судна. У статті здійснено фазифікацію вхідних змінних та дефазифікацію вихідних множин, розроблено нечіткі функції належності. В [3] розроблено систему керування курсом судна на основі класичного пропорційно-інтегрального регулятора та фази-регулятора. Також апарат нечіткої логіки застосовується в системах навігації [4], автопілотах [5], в системах стабілізації антен [6, 7].

© Стяжкін В.П., Зайченко О.А., Гаврилюк С.І., Рижков О.М., Теряєв В.І., Красношайка Н.Д., 2023

ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0003-0602-1112>; \*\* <https://orcid.org/0000-0001-9311-3378>;

\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-7345-8405>; \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-0011-9402>;

\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-8634-0895>; \*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-5449-2691>

Для детермінованих задаючих і збурювальних дій задача інваріантності електроприводу РЛС вирішується шляхом застосування комбінованого керування у сполученні зі спостерігачем навантаження. У [8] розроблено систему комбінованого керування електроприводом антени станції типу «МІУС», де перший (основний) канал системи діє за принципом керування за відхиленням вихідної величини (швидкості обертання антени) і має замкнутий контур швидкості, а другий канал, який діє за принципом керування за збуренням (моментом навантаження), має розімкнутий контур, що дало змогу підвищити якість статичних та динамічних режимів роботи.

Класичний регулятор швидкості, що застосовується в [8], має незмінну структуру та постійні параметри і налаштований на оптимальний режим, який може забезпечуватися лише у вузькому діапазоні заданої швидкості обертання антени та у заздалегідь визначених межах вітрового потоку. Розглянемо можливість удосконалення запропонованого детермінованого підходу з урахуванням збурювальних дій, пов'язаних з різкозмінним характером навантаження, а також позаштатними та аварійними ситуаціями. Вирішення даної проблеми можливо на основі використання апарату нечіткої логіки, що дає змогу об'єднувати відомі класичні закони регулювання, досвід експертних систем та має гнучку змінну структуру.

Таким чином, **метою роботи** є забезпечення заданих перехідних процесів швидкості обертання суднової антени радіолокаційної станції з безредукторним дугостаторним електроприводом в секторному режимі роботи, а також забезпечення його працездатності в критичних режимах граничного навантаження електродвигуна.

Нечітка система керування повинна забезпечити не тільки задану швидкість обертання антени, а і мінімальний час переключення з одного режиму на інший з мінімальною величиною перерегулювання. Для керування електроприводом з нечітким регулятором використовуються сигнали похідної від швидкості обертання, тобто кутового прискорення антени та величини швидкості вітрового потоку. За критичних значень вітрового потоку допускається відключати систему задля унеможливлення пошкодження механічних ланок.

На рис. 1 показано функціональну схему запропонованої комбінованої системи керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени РЛС з пропорційно-інтегрально-диференціальним нечітким регулятором швидкості обертання. Система складається з контролера завдання швидкості обертання  $LC$ , пропорційно-інтегрально-диференціального нечіткого логічного регулятора швидкості обертання антени, пристрою непрямого вимірювання моменту на валу антени станції  $M=f(v, \omega, \beta)$ , коригуючої ланки  $W_k$ , перетворювача частоти, дугостаторного двигуна  $M$ , антени та енкодера  $E$ .

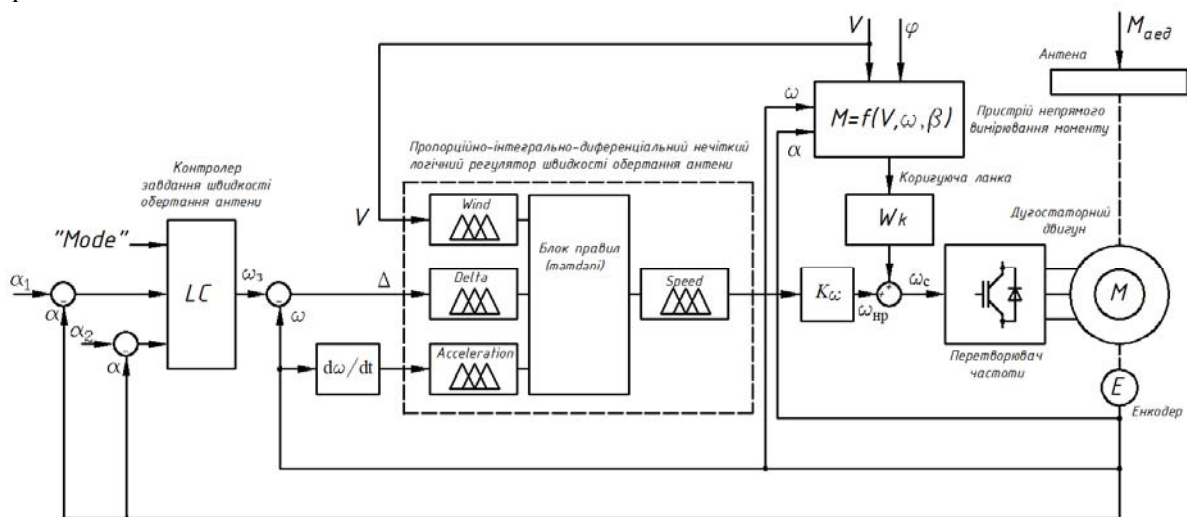


Рис. 1

Регулятор швидкості обертання антени формує сигнал завдання швидкості  $\omega_3$  в залежності від вибраного режиму роботи "Mode" (круговий або секторний) та ділянки траєкторії руху антени (перехід з великої швидкості на малу та навпаки) на основі заданих координат сектору  $\alpha_1, \alpha_2$  та сигналу зворотного зв'язку за положенням  $\alpha$ . Сигнали: розузгодження  $\Delta\omega$  – відхилення швидкості від заданого значення, похідної від швидкості  $d\omega/dt$  та швидкості вітрового потоку  $V$  є вхідними для нечіткого

регулятора. Регулятор швидкості на основі бази знань оцінює сигнал розузгодження, що є критерієм того, зменшувати чи збільшувати вихідний сигнал керування, а абсолютна величина сигналу при цьому не має значення. Для того щоб оцінити, яким було початкове та стало кінцеве значення завдання швидкості, введено сигнал похідної швидкості обертання антени, на основі якого відбувається коригування параметрів регулятора швидкості. Для компенсації впливу моменту навантаження на швидкість обертання антени введено прямий канал керування за збуренням. Після підсумовування вихідного підсиленого сигналу (з коефіцієнтом  $K_\omega$ ) нечіткого регулятора швидкості  $\omega_{np}$  і компенсуючого сигналу збурення, результуючий командний сигнал завдання швидкості  $\omega_c$  поступає на вхід перетворювача частоти електроприводу антени. Положення та швидкість ротора електродвигуна антени визначаються цифровим вимірювачем (енкодером).

Для визначення моменту навантаження електроприводу  $M_L$  непрямим шляхом і реалізації компенсуючого зв'язку за збуренням використовується отриманий в [8] вираз (1) залежності моменту аеродинамічного опору від швидкості вітру  $V$ , швидкості обертання антени  $\omega$  і кута її повороту  $\beta$

$$M_L = a \cdot \sin 2\beta \cdot V^2 + b \cdot \cos \beta \cdot \omega \cdot V + \delta \cdot \omega^2, \quad (1)$$

де  $a, b, \delta$  – постійні коефіцієнти, які залежать від конструктивних особливостей антени.

Вихідними даними для реалізації такого зв'язку є сигнали, пропорційні швидкості обертання  $\omega$  та кутового положення антени  $\alpha$  (від датчиків, встановлених на валу антени), а також сигнали, пропорційні швидкості  $V$  та напрямку вітрового потоку  $\varphi$  (від анеометра та пристрою вимірювання напрямку вітру, встановлених на борту судна). Вказані сигнали передаються з бортової навігаційної системи судна.

Непряме вимірювання координат забезпечує нові можливості електропривода і, в той же час, покращує надійність та підтримує високу якість його характеристик без збільшення вартісних і масогабаритних показників. Функціональну схему технічної реалізації пристрою для непрямого визначення моменту навантаження на валу антени згідно рівняння (1) представлено на рис. 2, де показано антену, встановлену на одному валу з ротором дугостаторного двигуна. Також показано індуктори, в яких розміщені обмотки, що представляють статор двигуна, датчики кутової швидкості й положення

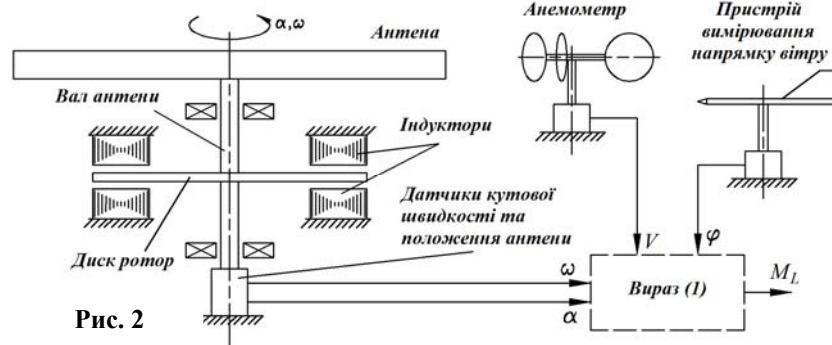


Рис. 2

антени та пристрої вимірювання швидкості і напрямку вітру. Безпосередньо сам пристрій непрямого вимірювання моменту представлений у вигляді структурної схеми, на яку заведено сигнали з датчиків, необхідні для обчислення моменту навантаження.

В результаті проведеного у [8] синтезу комбінованої системи керування отримано пере-

даточну функцію коригуючої пропорційно-диференційної ланки

$$W_k = (K_c \cdot K_m \cdot B)^{-1} + T_e \cdot (K_c \cdot K_m \cdot B)^{-1} \cdot p, \quad (2)$$

де  $K_c$  – коефіцієнт передачі перетворювача частоти;  $K_m, T_e, B$  – коефіцієнт передачі, електромагнітна стала часу і жорсткість механічної характеристики дугостаторного двигуна.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний нечіткий регулятор швидкості повинен забезпечити стабілізацію заданого значення швидкості обертання антени та заданий перехідний процес електромеханічної системи. З цією метою потрібно контролювати величину похідної швидкості обертання антени і таким чином забезпечувати необхідну динаміку, а також визначати швидкість вітрового потоку задля підтримання заданої статичної точності. Сформуємо наступні лінгвістичні змінні: три вхідних – *Wind* (швидкість вітрового потоку  $V$ ), *Delta* (розузгодження між швидкістю завдання та швидкістю антени  $\Delta\omega$ ), *Acceleration* (прискорення  $d\omega/dt$ ) та одна вихідна *Control* (сигнал керування). Установимо межі області зміни базових фізичних змінних:  $V$  – від 0 до 50 м/с;  $\Delta\omega$  – від -30 до 30 об/хв;  $d\omega/dt$  – від 0 до 180 об/хв<sup>2</sup>; *Control* – від -1 до 1.

На встановлених границях реальних фізичних величин виділяємо нечіткі множини, встановлюємо їхню кількість, даємо їм назви та вводимо обмеження у вигляді функцій належності, виходячи із мотивації якості керування. Кількість нечітких множин вибирається оптимальною, тобто чим більша кількість, тим якісніше і точніше можливо описати процес, але при цьому значно збільшується

кількість правил бази знань, що призводить до збільшення потужності обчислювального процесора, на якому реалізується нечіткий контролер.

Так для лінгвістичних змінних встановлюємо нечіткі змінні з термами:

*Wind* – L (Low), H (High), VH (Very high);

*Delta* – Hn (High negative), Ln (Low negative), Z (Zero), L (Low positive), H (High positive);

*Acceleration* – L (Low), N (Normal), H (High);

*Control* – Hn (High negative), Ln (Low negative), Z (Zero), L (Low positive), H (High positive).

Границі діапазонів вхідних та вихідної нечітких змінних та графічні форми їхніх функцій належності ( $\mu_V$ ,  $\mu_\Delta$ ,  $\mu_{d\omega/dt}$ ,  $\mu_{Control}$ ) показані на рис. 3 а, б, в, г відповідно.

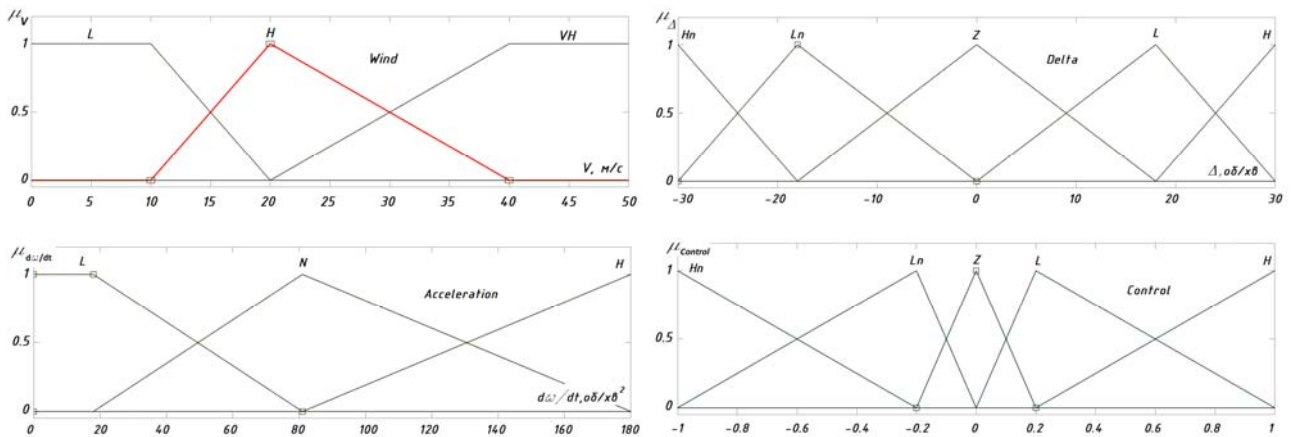


Рис. 3 (а, б, в, г)

Остаточну базу правил пропорційно-інтегрально-диференціального нечіткого регулятора складено 45-ти правилами та приведено в таблиці. Перед складанням остаточної бази правил нечіткого регулятора проводиться визначення попередньої бази правил, моделювання, потім коригування правил і так декілька ітерацій поки не буде отримано бажаного результату. Нечіткий регулятор формує сигнал керування за критерієм стабілізації значення швидкості обертання антени станції за величиною розузгодження, при цьому відбувається контроль динаміки за величиною похідної швидкості з урахуванням швидкості вітрового потоку. Таким чином, регулятор приймає остаточне рішення не тільки в залежності від величини сигналу розузгодження (як це відбувається за класичного керування), але й від сигналів швидкості вітрового потоку та прискорення антени на даний момент часу, на основі бази знань та значення вихідного сигналу керування.

Правило	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23		
Delta	Hn									Ln									L						
Wind	L	L	L	H	H	H	VH	VH	VH	L	L	L	H	H	H	VH	VH	VH	L	L	L	H	H		
Acceler	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N		
Control	H	H	L	H	L	L	L	Z	Z	L	L	L	L	L	Z	L	Z	Z	Ln	Ln	Ln	Ln	Ln		
Правило	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45			
Delta	L				H									Z											
Wind	H	VH	VH	VH	L	L	L	H	H	H	VH	VH	VH	L	L	L	H	H	H	VH	VH	VH			
Acceler	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H			
Control	Z	Ln	Z	Z	Hn	Hn	Ln	Hn	Ln	Ln	Ln	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z			

Для більш докладного пояснення логіки прийняття рішень нечіткого регулятора розглянемо декілька правил з таблиці. Якщо, наприклад, сигнал розузгодження буде великим від'ємним Hn, то за низького вітрового потоку L та малого прискорення L вихідний сигнал керування буде великим додатнім H (правило 1), але якщо сигнал прискорення стане високим H, сигнал керування стане низьким додатнім L (правило 3). Але, якщо сигнал розузгодження буде великим додатнім H, то за низького вітрового потоку L та малого прискорення L вихідний сигнал керування буде великим від'ємним Hn (правило 28) та низьким від'ємним Ln (правило 30) за низького вітрового потоку L та великого прискорення H. А, наприклад, за дуже високого вітрового потоку VH незалежно від значень розузгодження та прискорення вихідний сигнал керування буде нульовим Z. Таким чином, фактично відбувається коригування передаточних функцій регулятора швидкості та коригуючої ланки в залежності від завдання та зовнішніх умов.

Формування нечіткого логічного вихідного сигналу відбувається на основі алгоритму *Mamdani*, який широко застосовується в системах з нелінійною поведінкою параметрів та в системах стабілізації параметрів з пропорційно-інтегральними та пропорційно-інтегрально-диференціальними законами керування. У випадку нелінійної системи для РЛС з дугостаторним електроприводом вибраний алгоритм *Mamdani* найкраще відображає характер прийняття нечіткого логічного рішення. Запропонований алгоритм у повному обсязі реалізує формування відношень вхідних та вихідних лінгвістичних змінних для отримання нечіткого логічного рішення та формування фізичного сигналу керування швидкості обертання антени. На етапі прийняття логічного рішення використовується метод *MIN-MAX*, дефазифікація проводиться методом центру тяжіння *COG*. В результаті моделювання процесу керування на основі алгоритму *Mamdani* отримано передаточні характеристики пропорційно-інтегрального нечіткого регулятора швидкості обертання антени РЛС. На рис. 4, а показано поверхню залежності вихідної змінної *Control* від вхідних змінних *Delta* та *Wind*, а на рис. 4, б – вихідної змінної *Control* від вхідних змінних *Delta* та *Acceleration*. Отримані поверхні наочно відображають роботу нечіткого регулятора по прийманню рішення керування, що підтверджує правильність вибору та розміщення лінгвістичних змінних, а також їхніх функцій належності. Так, по виду поверхонь видно, що в робочому режимі за наявності додатного чи від’ємного сигналу розузгодження регулятор видає додатний чи від’ємний сигнал керування, при цьому абсолютне значення сигналу керування збільшується через збільшення сигналу розузгодження. Але, наприклад, якщо значення сигналу швидкості вітрового потоку збільшується до гранично допустимого, то регулятор зупиняє систему, а за нульового або малого значення вітрового потоку вихідний сигнал керування може досягати максимальних значень. Аналогічно регулятор приймає рішення відносно вихідного сигналу керування в залежності від сигналу похідної за швидкістю обертання в кожний момент часу.

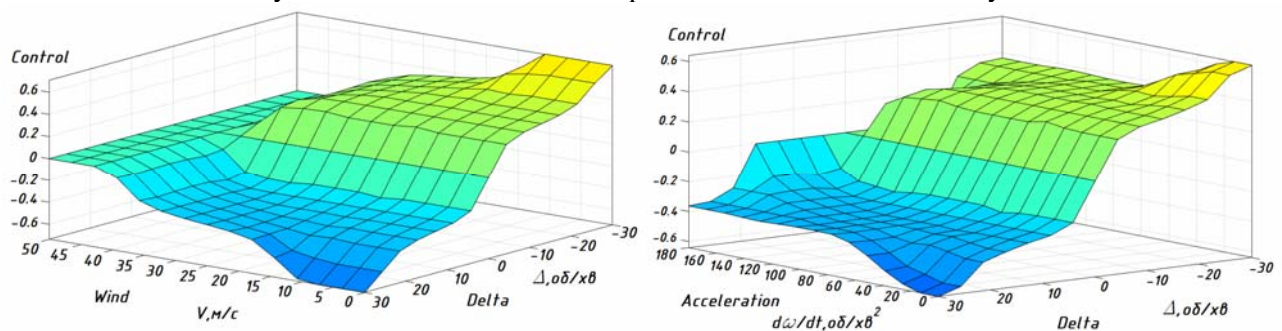


Рис. 4 (а, б)

На основі функціональної схеми, представлені на рис. 1, створено імітаційну модель системи керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени РЛС (рис. 5). Модель складається з наступних елементів: задатчика сигналу швидкості антени (*Speed Control Signal*); датчика швидкості вітру (*Wind*) та датчика моменту навантаження (*Torque*); нечіткого логічного контролера (*Fuzzy Logic Controller*); частотного перетворювача (*Frequency Converter*); дугостаторного двигуна (*Arc-core Induction Motor*); підсилювача (*Kw*); коригуючої ланки (*Wk*); а також блоків візуалізації процесів *Scope (speed)* та *Scope (torque)*, виводу даних в робочу область *Matlab (simout)* та таймеру (*Timer*).

Дугостаторний двигун представлений у вигляді відомої узагальненої двофазної моделі з перетворювачем частоти [9]. На вході перетворювача частоти сигнал завдання швидкості  $W_c$ , а на виході –

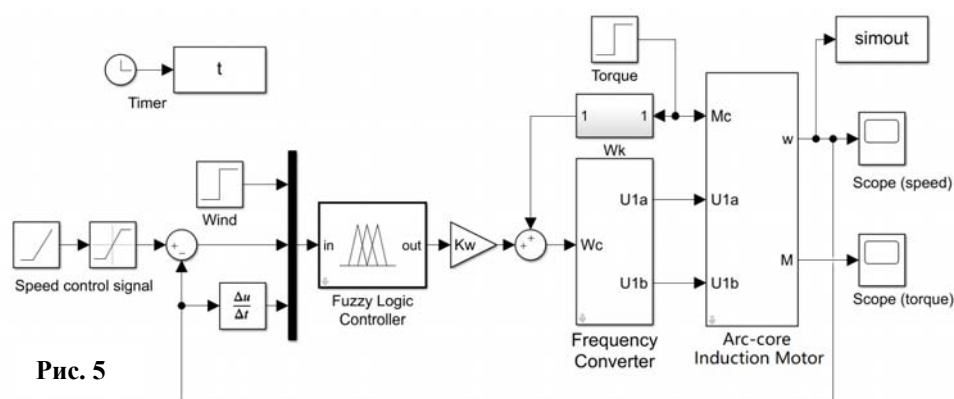


Рис. 5

напруги статора двигуна в координатах *a-b*  $U_{1a}$  та  $U_{1b}$ , які є вхідними для двигуна. Також, на вході двигуна момент навантаження  $M_c$ , а на виході – швидкість  $w$  та момент на валу  $M$ .

Для перевірки роботи алгоритму керування нечіткого регулятора використову-

вався багатополосний тихохідний асинхронний електродвигун з частотним керуванням за стандартного налаштування за законом  $U/f^2 = \text{const}$  з наступними параметрами: число пар полюсів 20; номінальна швидкість обертання 60 об/хв=6.28 рад/с; номінальний момент 40 Н·м; максимальний момент 100 Н·м; номінальне ковзання 0.5; сумарний приведений момент інерції на валу 0.735 кг·м<sup>2</sup>.

На рис. 6 представлено графіки процесу пуску електроприводу антени з початковим навантаженням 5 Н·м під час використання датчика інтенсивності з прискоренням 10.5 рад/с<sup>2</sup> з наступним накиданням у 0.8 с навантаження 40 Н·м, що відповідає пориву вітру в номінальному режимі. На виносці рис. 6, а, у збільшеному масштабі показано графіки динамічного падіння швидкості за ступінчатого прикладання навантаження в системі без коригуючої ланки  $\omega_1$  та за наявності коригуючої ланки  $\omega_2$ . На рис. 6, б наведено відповідні графіки зміни моменту двигуна  $M_1$  та  $M_2$ .

З графіків перехідних процесів номінального режиму видно, що динамічне падіння швидкості в системі з корекцією складає 0.1 рад/с і знизилося у 2 рази в порівнянні з системою без корекції, при цьому час відновлення швидкості зменшився у 5 разів і складає 0.05 с.

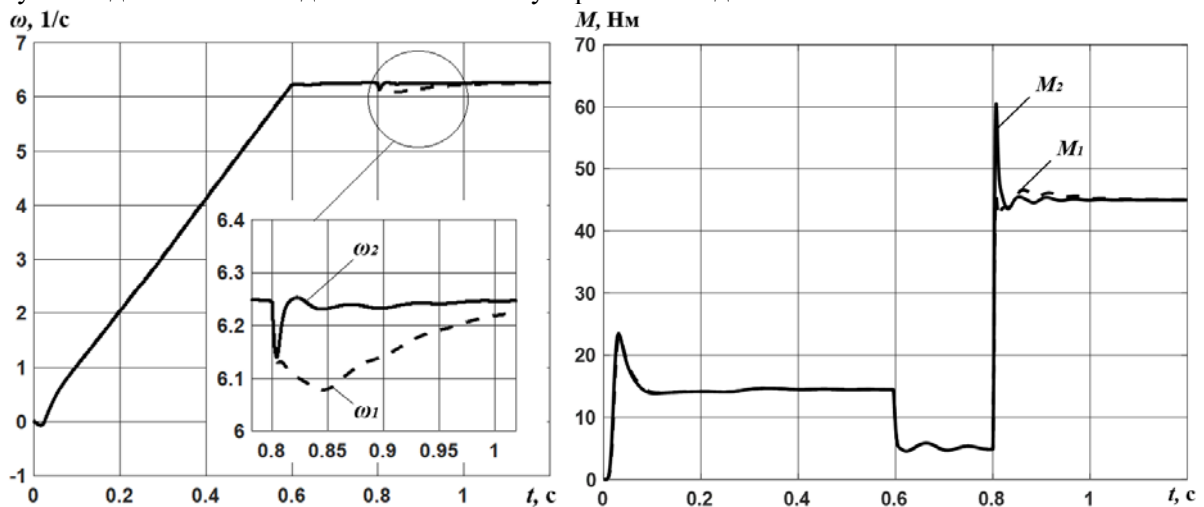


Рис. 6 (а, б)

На рис. 7 представлено графіки процесу пуску електроприводу антени з початковим навантаженням 5 Н·м з наступним накиданням у 0.8 с навантаження 80 Н·м, що імітує порив вітру у критичному режимі. На виносці рис. 7, а показані графіки динамічного падіння швидкості в системі без корекції  $\omega_1$  та з корекцією  $\omega_2$ . Відповідні графіки зміни моменту двигуна наведено на рис. 7, б.

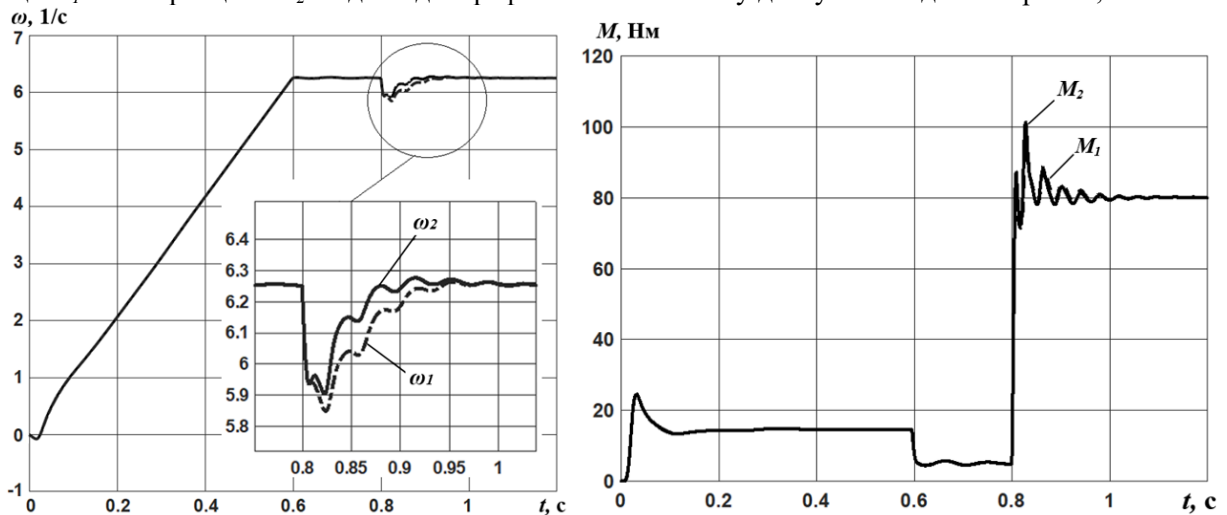


Рис. 7 (а, б)

З графіків перехідних процесів для критичного режиму видно, що динамічне падіння швидкості в системі з корекцією складає 0.4 рад/с і знизилося в 1.2 рази у порівнянні з системою без корекції, при цьому час відновлення швидкості зменшився у 2 рази і складає 0.1 с. Деяке зниження показників якості регулювання під час використання корекції, яке спостерігається в критичному режимі, пояснюється обмеженням моменту електродвигуна та насиченням ланок системи керування. При цьому передаточна функція коригуючої ланки була переналаштована регулятором з пропорційно-

диференціальної на пропорційну з одночасним зменшенням коефіцієнту передачі у 2 рази, що пов'язано з неефективністю регулювання за похідними в умовах обмеження сигналів.

За результатами моделювання режимів роботи електроприводу можна зробити висновок, що за номінального моменту навантаження на робочій швидкості відносна величина динамічного падіння швидкості обертання антени не перевищує 2 %; при цьому час відновлення швидкості складає 0.1 с, а у разі гранично можливого моменту навантаження на робочій швидкості величина динамічного падіння швидкості обертання антени становить 6 %; при цьому час відновлення швидкості не перевищує 0.15 с.

Однією з переваг синтезованого нечіткого регулятора швидкості є його простота, відносно невисока вартість та можливість впровадження на вже існуючих електроприводах антен. Нечіткий регулятор може бути реалізовано як у складі автоматизованої комп'ютерної системи, так і як окремі пристрій на відносно недорогому мікроконтролері середньої або малої потужності. Так, наприклад, цілком достатньо потужності мікроконтролера на базі сучасного удосконаленого 32-бітного ядра з RISC архітектурою Arm Cortex M0 будь-якого відомого виробника, серед яких STMicroelectronics, Microchip, NXP, Texas Instruments, Analog Devices та інші. Для зберігання таблиці знань, нечітких змінних та самої виконавчої програми в даних мікроконтролерах достатньо вбудованої *Flash* пам'яті до 64 кБайт. А продуктивності мікроконтролерів, які можуть працювати з частотою ядра до 64 МГц, достатньо для програмної реалізації всіх необхідних математичних логічних обчислень, фазифікації, дефазифікації та нечітких алгоритмів в режимі реального часу. Для спілкування з зовнішніми джерелами, тобто отримання інформації з анемометра, енкодера та контролера завдання швидкості обертання антени, а також виведення сигналу керування вказані мікроконтролери мають вбудовані багатоканальні 12-бітні аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, цифрові порти, комунікаційні інтерфейси та інші.

#### **Висновки.**

1. Запропоновано новий підхід до побудови систем електроприводу антен радіолокаційних станцій з безредукторними дугостаторними електродвигунами на основі використання відносно простого та надійного, з точки зору технічної реалізації, нечіткого пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора швидкості.

2. Проведено синтез нечіткого регулятора швидкості обертання антени радіолокаційної станції. Прийняття рішення нечіткого логічного висновку відбувається на основі алгоритму *Mamdani*, що формується згідно складеної на основі експертного досвіду бази правил. Керування електроприводом антени станції формується нечітким регулятором на основі сигналів цифрового вимірювача швидкості та кута обертання антени (енкодера) та вимірювача швидкості вітрового потоку (анемометра).

4. Результати синтезу нечіткого регулятора підтверджуються проведеним моделюванням в середовищі *Matlab*. Наведені в роботі результати моделювання найбільш важкого режиму роботи антени показали ефективність застосування нечіткого регулятора. Незалежно від заданих початкових та кінцевих значень швидкості обертання, а також швидкості вітрового потоку, адаптивний регулятор перелаштовує систему під змінні умови та зовнішні впливи, в результаті чого перехідний процес триває не більше 0.1-0.2 с, а перегулювання не перевищує 5-6 %, що задовольняє технічним вимогам до електроприводів антен станцій, які розглядаються в даній роботі.

5. Синтезований нечіткий регулятор у сполученні з комбінованою системою керування дає змогу налаштувати електропривод антени радіолокаційної станції на оптимальний режим роботи незалежно від завдання та зовнішніх умов. Раніше, під час роботи антени станції в секторному режимі, тобто з постійним перемиканням з однієї швидкості обертання на іншу, величина якої постійно змінюється, забезпечити задані показники якості регулювання не було можливим.

*Роботу виконано за державної науково-дослідної роботи "База-П9" («Розробити засоби та алгоритми керування напругою, струмом і частотою в гібридних системах живлення електротехнологічних установок при неповній визначеності параметрів навантаження»), державний реєстраційний номер 0122U001808, КПКВК 6541030.*

**Статтю присвячено пам'яті Стяжкіна Віталія Павловича, випускника КПІ ім. Ігоря Сікорського, старшого наукового співробітника ІЕД НАНУ, засновника Науково-технічної фірми ТЕМС і є узагальненням та розвитком його напрацювань в галузі автоматизованого електропривода та використання апарату нечіткої логіки.**

1. Стеклов В.К., Милько Р.Э. Системы управления с безредукторным приводом. Київ: Техніка, 1983. 120 с.
2. Surendran S., Kiran. V. Control of ship roll motion using active fins using fuzzy logic. *Ships and Offshore Structures*. 2007. Vol. 2. No 1. Pp. 11-20. DOI: <https://doi.org/10.1533/saos.2006.0105>.
3. Leea Gyoungwoo, Surendranb S., Kimc Sang-Hyun. Algorithms to control the moving ship during harbour entry. *Applied Mathematical Modelling*. 2009. Vol. 33. No 5. Pp. 2474-2490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.01.008>.
4. Sethuramalingam T.K. Fuzzy logic controller based ship navigation system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1850. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1850/1/012113>.
5. Vukić Z., Omerdić E., Kuljača L. Fuzzy autopilot for ships experiencing shallow water effect in manoeuvring. *IFAC Proceedings Volumes*. 1997. Vol. 30. No 22. Pp. 66-104. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)46497-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)46497-4).
6. Tseng H.C., Teo D.W. Ship-mounted satellite tracking antenna with fuzzy logic control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1998. Vol. 34. No 2. Pp. 639-645. DOI: <https://doi.org/10.1109/7.670345>.
7. Wang Y., Soltani M., Dil Muhammad Akbar Hussain, Christensen Roald M. Design and implementation of attitude stabilization system for marine satellite tracking antenna. *Electronics*. 2018. Vol 7. No 12. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7120398>.
8. Стяжкін В.П., Зайченко О.А., Теряев В.І., Гаврилюк С.І. Комбіноване керування безредукторним дугостаторним електроприводом антени суднової радіолокаційної станції. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 6. С. 36-42. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.036>.
9. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Київ: Либідь, 2005. 680 с.

#### COMBINED CONTROL OF GEARLESS ARC-CORE SHIP RADAR ANTENNA ELECTRIC DRIVE WITH FUZZY LOGIC REGULATOR

V.P. Stiazhkin<sup>1</sup>, O.A. Zaichenko<sup>1</sup>, S.I. Gavryluk<sup>1</sup>, O.M. Ryzhkov<sup>1</sup>, V.I. Teriaiev<sup>2</sup>, N.D. Krasnoshapka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,

Peremohy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [tems@ukr.net](mailto:tems@ukr.net), [serggtm@gmail.com](mailto:serggtm@gmail.com).

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

E-mail: [kpivit@gmail.com](mailto:kpivit@gmail.com), [n.krasnoshapka@gmail.com](mailto:n.krasnoshapka@gmail.com).

The synthesis of a fuzzy proportional-integral-differential speed regulator of the arc stator electric drive of the rotation of the radar station antenna with combined control was carried out. The structural diagram of the fuzzy regulator was developed, the input and output linguistic variables are defined, the rule base was compiled, the dependence surfaces of the output control variable on the input coordinates are obtained. A simulation model of an electric drive in the Matlab system with a synthesized fuzzy logic regulator based on a two-phase model of an asynchronous arc-stator motor was built. Modeling of the nominal and the most difficult mode of operation of the electric drive was carried out, graphs of transient processes were obtained, which confirm its operability even under conditions of extreme loads. Refrefces 9, figures 7, table 1.

**Key words:** proportional-integral-differential fuzzy logic controller, ship's radar station antenna, gearless arc-core electric drive, combined automatic control system.

1. Steklov V.K., Milko R.E. Gearless drives control systems. Kyiv: Tehnika, 1983. 120 p. (Rus)
2. Surendran S., Kiran. V. Control of ship roll motion using active fins using fuzzy logic. *Ships and Offshore Structures*. 2007. Vol. 2. No 1. Pp. 11-20. DOI: <https://doi.org/10.1533/saos.2006.0105>.
3. Leea Gyoungwoo, Surendranb S., Kimc Sang-Hyun. Algorithms to control the moving ship during harbour entry. *Applied Mathematical Modelling*. 2009. Vol. 33. No 5. Pp. 2474-2490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.01.008>.
4. Sethuramalingam T.K. Fuzzy logic controller based ship navigation system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1850. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1850/1/012113>.
5. Vukić Z., Omerdić E., Kuljača L. Fuzzy autopilot for ships experiencing shallow water effect in manoeuvring. *IFAC Proceedings Volumes*. 1997. Vol. 30. No 22. Pp. 66-104. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)46497-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)46497-4).
6. Tseng H.C., Teo D.W. Ship-mounted satellite tracking antenna with fuzzy logic control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1998. Vol. 34. No 2. Pp. 639-645. DOI: <https://doi.org/10.1109/7.670345>.
7. Wang Y., Soltani M., Dil Muhammad Akbar Hussain, Christensen Roald M. Design and implementation of attitude stabilization system for marine satellite tracking antenna. *Electronics*. 2018. Vol 7. No 12. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7120398>.
8. Stiazhkin V.P., Zaichenko O.A., Teriaiev V.I., Gavryluk S.I. Combined control of gearless arc-core ship radar antenna electric drive. *Tekhhnicha Elektrodynamika*. 2020. No 6. Pp. 36-42. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.036> (Ukr).
9. Popovich M.G., Lozynskij O.J., Klepikov V.B. Electromechanical automatic control systems and electric drives. Kyiv: Lybid, 2005. 680 p. (Ukr).

Надійшла 06.12.2022  
Остаточний варіант 23.02.2023