

УДК 62-523.2+007.52 : 621.318.3

НЕЙРО-НЕЧІТКІ СПОСТЕРІГАЧІ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРИТИСКНОГО ЗУСИЛЛЯ МАГНІТОКЕРОВАНИХ РУШІЇВ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Ю.П.Кондратенко¹, докт.техн.наук, Йоахім Рудольф², докт.техн.наук, О.В.Козлов³, канд.техн.наук,
Ю.М.Запорожець¹, канд.техн.наук, О.С.Герасін³,

¹- Чорноморський державний університет ім. П. Могили,
вул. 68-ми Десантників, 10, Миколаїв, 54003, Україна,
e-mail: y_kondrat2002@yahoo.com

²- Саарландський університет,
Кампус А5.1, Саарбрюкен, 66123, Німеччина,

³- Національний університет кораблебудування ім. адм. С.І. Макарова,
пр. Героїв Сталінграду, 9, Миколаїв, 54025, Україна.

Запропоновано моделі спостерігачів для ідентифікації притискного зусилля магнітокерованих рушіїв мобільних роботів для переміщення по похилих і вертикальних феромагнітних поверхнях на основі гібридної нейро-нечіткої обчислювальної системи (ННОС) типу ANFIS. Наведено результати експериментальних досліджень сили відриву в різних просторових положеннях притискного магніту відносно феромагнітної поверхні, що забезпечує ефективне навчання ННОС, вбудованої в систему автоматичного керування притискними зусиллями мобільного робота. Проведено порівняльний аналіз розроблених спостерігачів з різними типами функцій належності. Представлено результати ідентифікації формованого притискного зусилля та результати аналізу адекватності синтезованих моделей спостерігачів. Бібл. 14, рис. 4, табл. 3.

Ключові слова: мобільний робот, магнітокерований рушіїв, електромагнітне поле, притискний електромагніт, система керування притискним зусиллям, нейро-нечіткий спостерігач.

При виконанні технологічних операцій у суднобудуванні та судноремонті відчувається особлива потреба в мобільних роботах (МР), здатних переміщуватися по горизонтальних, похилих або вертикальних поверхнях за допомогою різнотипних рушіїв та притискних пристроїв, зокрема для очищення зовнішніх поверхонь суден, а також інших конструкцій на плаву або у сухому доці [1–3, 11,13,14]. Однією з головних систем таких робототехнічних об'єктів є система автоматичного керування зчепленням з робочою поверхнею. Для роботизованого очищення поверхонь найчастіше використовуються пневматичні (або гідравлічні) притискні пристрої універсального застосування, які служать для утримання на робочій поверхні та одночасного виконання заданої технологічної операції очищення [1-3,13]. У такому разі зусилля для кріплення таких очисно-притискних пристроїв має бути достатнім, щоб МР на їхній базі не тільки утримувався в заданому положенні на вертикальній поверхні, а й безаварійно переміщувався. Основним недоліком вакуумних притискних пристроїв у конструкціях МР є низька надійність при проходженні неоднорідних поверхонь (наприклад, зварних швів), які деформують вакуумне ущільнення і можуть призвести до відриву та падіння, вимагають значних витрат на часте обслуговування та заміну. Майже неможливий рух таких роботів на високих швидкостях, необхідних для підвищення продуктивності виконання заданих технологічних операцій.

Для феромагнітних конструкцій, типових у суднобудуванні, судноремонті та деяких інших застосуваннях природною альтернативою вакуумним є притискні пристрої на базі постійних магнітів, електромагнітів або їхніх комбінацій [1–3,11,13,14]. Зазвичай такі притискні пристрої вмонтовані в елементи приводу переміщення: в гусеничні стрічки [2], в ободи коліс [11], ноги [14] або нерухомі (несучі) елементи конструкції [11]. Спільним недоліком подібних рішень є обмежена прохідність роботів по численних неоднорідних поверхнях, ускладнених обростаннями організмами водного середовища, або які певним чином пошкоджені в результаті тривалого використання. Прикладами таких поверхонь є феромагнітні корпуси суден, стінки резервуарів, опори мостів, конструкції трубопроводів та ін.

Для виконання різнотипних технологічних операцій на згаданих феромагнітних поверхнях найбільш доречним рішенням є застосування магнітокерованих коліс-рушіїв, розроблених співавторами для МР [3]. Принциповою особливістю цього новітнього типу рушія є суміщення ним функцій утримання та переміщення МР по феромагнітній поверхні завдяки оснащенню їх магніто-керованими притискними пристроями (МПП) з тяговим приводом.

Головною проблемою при проектуванні та експлуатації МР є визначення і контроль (спостереження) притискних зусиль (ПЗ) у процесі керування рушієм зазначеного типу згідно з [4]. Конструктивне виконання зазначеного колеса-рушія разом із системою керування є оригінальними та не мають аналогів у вітчизняних та зарубіжних розробках. Разом з тим специфіка технологічних операцій, що виконують МР і, відповідно застосування притискних пристроїв на переважно нерівних поверхнях обумовлює особливості у визначенні зусиль, створюваних цими притискними пристроями. У даному випадку найбільш значущою особливістю є необхідність врахування постійних змін конфігурації контакту МПП у вигляді притискних електромагнітів (ПЕ) з робочою поверхнею внаслідок наявності обростань, пошкоджень або інших неоднорідностей поверхні. Хоча існують підходи до розрахунку зусиль притягнення магнітів та електромагнітів до феромагнітної поверхні на базі рівнянь Максвелла, Лапласа, метода дзеркальних відображень [7,9], проте внаслідок зазначених особливостей вони не можуть бути застосовані (спільним для цих підходів є визначення зусиль у статичних конструкціях електромеханічних пристроїв). Крім того, відсутність рекомендацій до синтезу систем керування цими зусиллями у цілому ускладнює можливість експлуатації подібних систем у реальних умовах. Тому дана робота присвячена опрацюванню проблеми визначення та спостереження ПЗ, які формуються МПП при змінюваній конфігурації контакту з феромагнітною робочою поверхнею, зокрема попередній оцінці цього зусилля до виконання МР чергового кроку переміщення в деяке нове положення.

Відомо, що залежність електромагнітного зусилля, створюваного ПЕ, від зазору є оберненою степеневою функцією [7], тому навіть незначне збільшення зазору призводить до суттєвого зменшення значення зусилля. Враховуючи можливість виконання роботом технологічних операцій в умовах невизначеності через значну шорсткість робочої поверхні, наявність суттєвих неоднорідностей (наприклад, зварних швів, порожніх отворів та ін.), людині-оператору або автономній системі автоматичного керування (САК) необхідно отримувати поточну інформацію про реальне значення величини ПЗ [13].

Застосування окремих датчиків сили (тензодатчиків) у даному випадку є недоцільним саме через невизначеність характеристик феромагнітної поверхні (зокрема, невідомою є точка прикладення притискного зусилля). Використання як тензодатчика електропровідних еластомерів (для покриття всієї площі поверхні електромагніту, яка притискається до поверхні) також не є перспективним через значні втрати (ослаблення) притискного зусилля та ускладнює або навіть унеможливує процедуру калібрування таких габаритних датчиків. Одним із можливих способів визначення діючого значення притискного зусилля є встановлення датчиків проковзування [13], де роль об'єкта проковзування відіграє сама феромагнітна поверхня. Однак при цьому можливі такі положення мобільного робота, коли навіть за максимальних значень сигналу керування не вдається сформувати потрібне притискне зусилля для надійного зчеплення МР з поверхнею, і робот може не втриматися на феромагнітній поверхні (наприклад, при значних обростаннях корпусу судна морськими мікроорганізмами).

На думку авторів, найбільш перспективним підходом до визначення фактичної величини притискного зусилля, створюваного електромагнітом, є непряме оцінювання [8]. Реалізація даного підходу передбачає побудову ідентифікатора зусилля, який за відомими вхідними вимірювальними фізичними величинами оцінює вихідний сигнал – величину притискного зусилля. Враховуючи суттєву залежність притискного зусилля МПП від невизначеностей феромагнітної поверхні (ФП) та зовнішніх факторів робочого середовища, які не залежать від оператора та не можуть бути точно обчислені головною САК робота, в даній статті запропоновано використання гібридних нейронних систем для синтезу спостерігача притискного зусилля.

Математичні моделі та системи управління на основі нечіткої логіки, штучних нейронних мереж і т.п. розроблені і успішно впроваджені для управління технологічними процесами, контролю транспорту, медичної і технічної діагностики, фінансового управління, прогнозування запасів, розпізнавання образів і т.п. [6,8,10,12,13]. Вдалі приклади застосування гібридних інтелектуальних систем [13] показали їхню здатність поєднувати в собі позитивні риси нечітких систем та нейронних мереж, одночасно компенсуючи їхні недоліки. Так, для нейронних мереж відсутнім є алгоритм розрахунку кількості шарів та кількості нейронів у кожному шарі, але вони мають можливість навчання та адаптації. Сильною стороною нечітких систем є можливість легкої модифікації баз правил та

функціонування за відсутності повних знань про залежності між входами та виходами системи (використовуються не кількісні, а якісні знання). Для врахування особливостей взаємодії МПП (на базі ПЕ) з феромагнітною поверхнею доцільно розробити математичну модель спостерігача для ідентифікації формованого електромагнітом притискного зусилля на основі адаптивної нейронної мережі з нечіткою системою логічного висновку [12,13].

Метою даної статті є формування моделей гібридних нейро-нечітких спостерігачів притискного зусилля для колісно-крокуючого робота з магнітокерованими колесами-рушійми, адаптивних до невизначеностей робочої поверхні і здатних попередньо ідентифікувати величину формованого притискного зусилля перед (а) безпосереднім зчепленням ноги робота з робочою поверхнею в зоні притискного електромагніту та (б) виконанням чергового кроку роботом.

Для досягнення поставленої мети розглянемо більш детально конструктивні особливості МР для переміщення по похилих та вертикальних феромагнітних поверхнях. Магнітокерований рушій

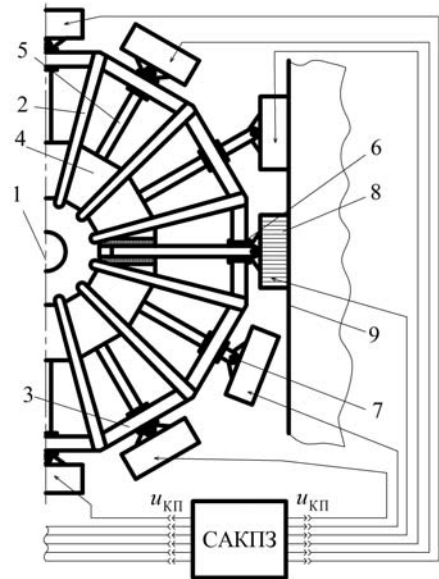


Рис. 1

МР у вигляді колеса [3], фрагмент якого схематично показаний на рис. 1, взаємодіє з САК формуванням притискного зусилля (САКПЗ). Геометрична вісь такого колеса-рушія l збігається з точкою взаємного перетину бісектрис внутрішніх кутів багатокутника колеса, а конструктивна міцність колеса-рушія забезпечується жорсткими спицями 2, секціями шини 3 і маточиною 4.

Рушійним механізмом виступають опорно-тягові ланки, які здійснюють переміщення МР. Кожна така ланка складається з розсувних спиць, нерухомі елементи яких вмонтовані в маточину 4, а рухомі елементи (у вигляді стрижнів 5) висунуті до оброблюваної феромагнітної поверхні 9 через напрямні отвори в секціях шини 3 з втулками 6. Притискні електромагніти 8 закріплені за допомогою шарнірів 7 до вільних кінців стрижнів та забезпечують задане значення притискного зусилля.

При розробці систем зчеплення на базі електромагнітів головна увага приділяється створенню необхідного притискного зусилля F для утримання МР на робочій поверхні. Причому значення утримувальної сили F розраховується як

$$F = k_{sf} F_{min}, \quad (1)$$

де F_{min} – мінімально допустиме значення зусилля; k_{sf} – коефіцієнт запасу. Формування утримувального зусилля F забезпечується САКПЗ як складовою головної системи керування МР.

На рис. 2, а показано розроблену авторами САКПЗ електромагнітного притискного пристрою, який є складовою частиною магнітокерованого колісного рушія МР [1]. Задавальний пристрій (ЗП) надсилає задане значення ПЗ у вигляді сигналу $u_{зз}$ (задається оператором або САК переміщенням МР для кожного магніту). Сигнал помилки керування ε_c (сигнал розузгодження між $u_{зз}$ та вихідним сигналом гібридного спостерігача $u_{сз}$) надходить на регулятор притискного зусилля (РПЗ), який формує сигнал керування $u_{рз}$ для кожного електромагніту.

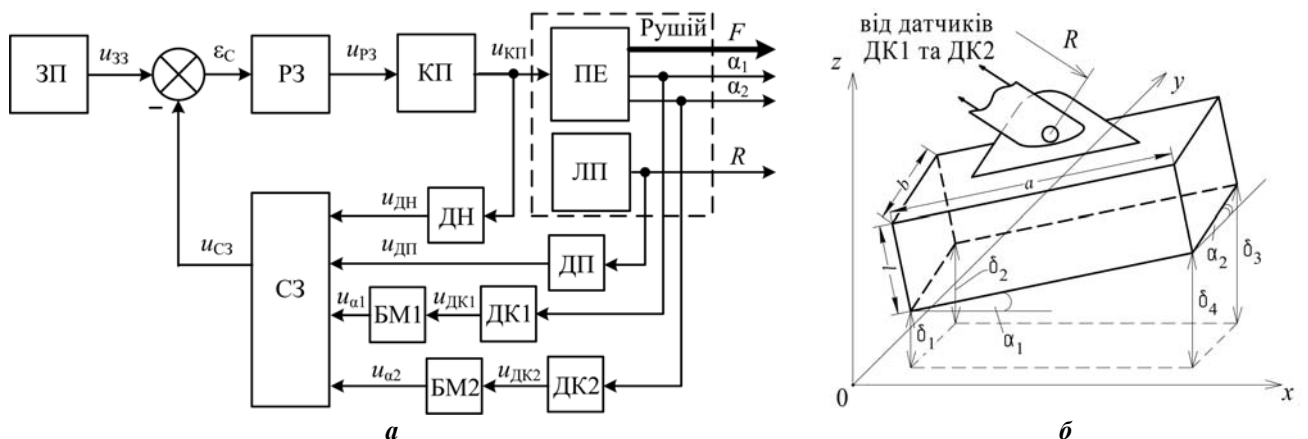


Рис. 2

Сигнали u_{p3} забезпечують формування керованим перетворювачем (КП) відповідного значення напруги $u_{кп}$ для відповідного ПЕ. При цьому ПЕ зчіплюється з феромагнітною поверхнею, а ідентифікація реальних поточних значень притискного зусилля проводиться спостерігачем зусилля (СЗ), зокрема оцінка значень формованих ПЗ електромагнітів (у вигляді сигналів u_{c3}) здійснюється СЗ на основі даних про просторове положення ПЕ та живлячу електромагніт напругу.

Під час руху МР просторове положення призматичного ПЕ з розмірами $a \times b \times l$ (рис. 2, б), де a – ширина, b – довжина, а l – висота магніту, залежить від характеру ФП. Зокрема, перешкоди, розміщені на поверхні, обумовлюють різні значення відстаней від вершин паралелепіпеда магніту до поверхні $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$. Різні значення можуть мати також кути нахилу притискної поверхні магніту до феромагнітної поверхні α_1, α_2 . Крім того, довжина висунутої частини розсувної спиці R лінійного приводу (ЛП) колеса-рушія також впливає на реальне значення формованого ПЗ. Зміна кутів нахилу притискної поверхні ПЕ до ФП α_1, α_2 відслідковується датчиками кутів ДК1 та ДК2 (сигнали $u_{дк1}$ та $u_{дк2}$). Далі блоки обчислення модуля БМ1 та БМ2 опрацьовують сигнали з ДК1 і ДК2 та формують сигнали u_{a1} та u_{a2} , які відповідають абсолютним значенням кутів α_1 та α_2 . Величина R визначається за допомогою індуктивного датчика переміщення ДП (сигнал $u_{дп}$). За допомогою датчика напруги (ДН) проводяться прямі вимірювання живлячої напруги (сигнал $u_{дн}$).

Феноменологічною основою функціонування магнітокерованого колісного рушія МР, яку розглянуто в роботі [3], є формування притискного зусилля ПЕ завдяки магнітній взаємодії (тобто – за допомогою магнітного поля \vec{H}) елементів ФП із полюсами електромагніту. Кожна компонента поля H_λ (координатний індекс λ приймає значення x, y або z у системі координат на рис. 2, б) створює відповідну складову зусиль, розподілених по всій площі полюсної грані зі щільністю

$$f_\lambda(x_k, y_k) = \mu_0 J H_\lambda(x_k, y_k), \quad (2)$$

де точка (x_k, y_k) є центром k -ої елементарної площадки полюса магніту; J – намагніченість полюса; H_λ – відповідні компоненти магнітного поля у точках (x_k, y_k) .

Отже, інтегральна величина притискного зусилля в умовах невизначеності характеристик поверхні та нерівномірності зазору між ПЕ та ФП навіть при однаковій величині магнітного потоку ПЕ залежить від розподілу магнітної індукції у зазорі. Тому для відстеження варіацій притискних зусиль притискні магніти оснащуються датчиками Холла (ДХ) для вимірювання значень індукції і визначення розрахунковим шляхом параметрів магнітного потоку та магнітної провідності зазору. Для цього до складу СЗ додається вбудований запрограмований процесор, який реалізує алгоритм обчислення магнітного потоку та магнітної провідності на основі розв'язання рівняння Лапласа для потенціалу магнітного поля у специфічній формі [1]:

$$\Delta U(x, y, z) \equiv \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = -\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \equiv -\rho_M, \quad (3)$$

яка може бути інтерпретована як рівняння Пуассона у двовірній прямокутній області (площині полюса електромагніту), де U – магнітний потенціал, а ρ_M – щільність умовного «магнітного заряду», що дорівнює

$$\rho_M = \partial^2 U / \partial z^2 \equiv \partial B_n / \partial n, \quad (4)$$

де $\partial B_n / \partial n$ – нормальна до поверхні полюса похідна складової магнітної індукції.

За методом Фур'є двовірний потенціал має вигляд

$$U(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n e^{\frac{n\pi}{b}x} + B_n e^{-\frac{n\pi}{b}x} \right) \sin \frac{n\pi}{b} y + \left(C_n e^{\frac{n\pi}{a}y} + D_n e^{-\frac{n\pi}{a}y} \right) \sin \frac{n\pi}{a} x, \quad (5)$$

де a та b – розміри прямокутного полюса, а невідомі коефіцієнти A_n, B_n, C_n та D_n визначаються зі специфічних крайових умов, які відрізняють цю задачу від традиційних задач Діріхле та Неймана, а саме: для визначення A_n, B_n, C_n та D_n складається система лінійних алгебраїчних рівнянь, в якій похідні вказаного потенціалу $U(x, y)$ прирівнюються до вимірних значень індукції, отриманих шляхом інтегрування виразу $\rho_M = -\Delta U(x, y)$.

У даному випадку вимірювання індукції необхідно здійснювати безпосередньо у зазорі, що призводить до збільшення цього зазору принаймні на товщину ДХ (і відповідного зменшення величини ПЗ). Крім того, кількість датчиків ДХ має бути достатньою для досягнення необхідної точності розрахунку зусиль (мінімум п'ять), що підвищує вимоги до обчислювального пристрою.

З урахуванням викладеного вище, при синтезі спостерігача авторами запропоновано заснований на використанні експериментальних даних підхід для розробки інтелектуальної моделі ПЕ як об'єкта управління ПЗ [12,13]. Загальне притискне зусилля F , яке повинне бути розраховане за допомогою спостерігача, визначається, з одного боку, інтегральною сумою магнітної індукції, створеної ПЕ на ФП, і, з іншого боку, суттєво залежить від таких параметрів як: кути нахилу ПЕ до ФП (α_1, α_2), виліт розсувної спиці (R) і напруга живлення ПЕ ($u_{\text{КП}}$).

Для ПЕ з розмірами $a=50,2$ мм; $b=31,0$ мм; $l=10,0$ мм проведено експериментальні дослідження з мінімальною кількістю вимірювань (625 точок) сили відриву в різних просторових положеннях ПЕ відносно феромагнітної поверхні. По суті накопичена база даних відповідає функціональній залежності

$$F = f(u_{\text{КП}}, \alpha_1, \alpha_2, R), \quad (6)$$

яка може бути синтезована на основі отриманих експериментальних даних. Фрагмент отриманої бази експериментальних даних наведено в табл. 1.

$u_{\text{КП}}$, В	4,2	4,2	5,6	5,6	6,8	6,8	8	8	9	9
α_1 , рад	0	0,0524	0	0,034	0	0,035	0	0,069	0	0,034
α_2 , рад	0	0,01	0,044	0	0,034	0,052	0,052	0	0	0,01
R , мм	15,51	14,91	13,61	15,51	12,97	14,91	13,61	15,51	15,51	14,24
F , Н	9,8	0,4	0,26	2	0,2	1,2	1,5	2,4	32,7	1,56

При розробці моделі спостерігача (2) для ідентифікації величини ПЗ доцільно здійснювати апроксимацію експериментальних даних (табл. 1) з використанням адаптивних ННОС типу ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System [13]), яка є одним із варіантів гібридних нейро-нечітких мереж, зокрема, нейронною мережею прямого поширення сигналу [12]. ANFIS реалізує систему нечіткого логічного виведення Сугено типу у вигляді п'ятишарової нейронної мережі прямого поширення сигналу. Це дозволяє застосовувати для налагодження нейро-нечітких мереж швидкі алгоритми їх навчання, засновані на реалізації методу зворотного поширення помилки. Структура нечіткого правила з порядковим номером r має наступний вигляд:

$$\text{IF } x_1 = a_{1,r} \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n = a_{n,r} \text{ THEN } y = b_{0,r} + b_{1,r}x_1 + \dots + b_{n,r}x_n, \quad (7)$$

де $r=1, \dots, m$ – номер відповідного правила; $a_{i,r}$ – нечіткий терм із функцією належності $\mu_r(x_i)$, який застосовується для лінгвістичної оцінки змінної x_i у правилі r ($r=1, \dots, m$; $i=1, \dots, n$); $b_{q,r}$ – дійсні числа у консеквенті правила r ($r=1, \dots, m$; $q=0, 1, \dots, n$). Функціональна структура типової ANFIS з двома входами x_1, x_2 та одним виходом y показана на рис. 3.

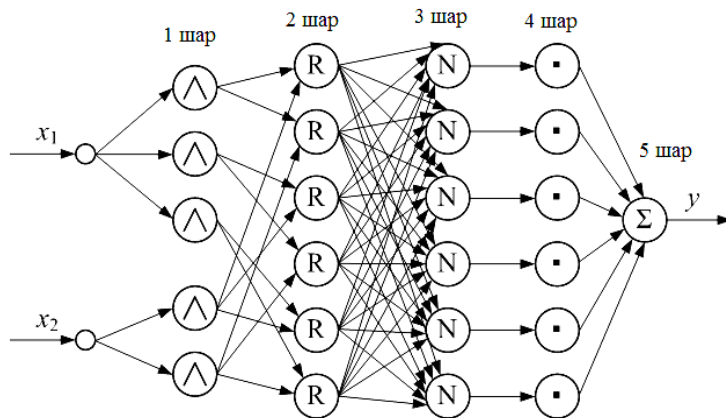


Рис. 3

де c, d, g – регульовані параметри функції належності.

2-й шар. Кількість вузлів другого шару дорівнює m . Кожний вузол цього шару відповідає одному нечіткому правилу. Вузол другого шару з'єднаний з тими вузлами першого шару, які формують антецеденти відповідного правила. Отже, кожен вузол другого шару може приймати від 1 до n вхідних сигналів. Виходом вузла є ступінь виконання правила, який розраховується як добуток вхідних сигналів. Позначимо виходи вузлів цього шару через $\tau_r, r=1, m$.

3-й шар. Кількість вузлів третього шару також дорівнює m . Кожний вузол цього шару розраховує відносний ступінь виконання нечіткого правила

Мережа ANFIS функціонує наступним чином.

1-й шар. Кожен вузол першого шару представляє собою відповідний лінгвістичний терм із певною функцією належності. Входи мережі x_1, x_2, \dots, x_n з'єднані тільки з їхніми термами. Виходом кожного вузла є ступінь належності вхідної змінної до відповідного нечіткого терма

$$\mu_r(x_i) = \left(1 + \left| \frac{x_i - g}{c} \right|^{2d} \right)^{-1}, \quad (8)$$

$$\tau_r^* = \tau_r \left(\sum_{j=1, m} \tau_j \right)^{-1} \quad (9)$$

4-й шар. Кількість вузлів четвертого шару також дорівнює m . Кожний вузол з'єднаний з одним вузлом третього шару, а також з усіма входами мережі. Вузол четвертого шару розраховує внесок одного нечіткого правила у вихід мережі

$$y_r = \tau_r^* \cdot (b_{0,r} + b_{1,r}x_1 + \dots + b_{n,r}x_n) \quad (10)$$

5-й шар. Єдиний вузол цього шару підсумовує висновки всіх правил

$$y = y_1 + \dots + y_r + \dots + y_m \quad (11)$$

Дослідження запропонованої ННОС на стадії її розробки показали, що форма функції належності лінгвістичних термів вхідних змінних істотно впливає на процес навчання та точність моделі СЗ [13]. Тому для досягнення високої адекватності даної нейро-нечіткої математичної моделі СЗ на стадії її проектування здійснено синтез ННОС із різними типами функцій належності лінгвістичних термів (трикутних, трапецієподібних, Гаусівського типу 1-го роду, Гаусівського типу 2-го роду, π -типу) вхідних змінних $u_{\text{КП}}$, α_1 , α_2 , та R . Для змінних α_1 та α_2 обрано по три лінгвістичні терми: L – низький, M – середній і H – високий; для змінних R та $u_{\text{КП}}$ – п'ять термів: Z – нульова, S – мала, M – середня, B – велика і VB – дуже велика. База правил запропонованої ННОС складається з 225 правил, які відповідають усім комбінаціям чотирьох вхідних нечітких змінних. У цьому випадку кількість коефіцієнтів правил $b_{q,r}$ дорівнює 900.

Вихідну базу з 625 експериментальних точок, фрагмент якої представлений у табл. 1, було розділено практично порівну (313/312) на дві вибірки рівномірно по всьому діапазону вхідних даних. Далі перша вибірка (313) була використана для навчання ННОС за допомогою гібридного методу навчання, який об'єднує в собі метод зворотного поширення помилки і метод найменших квадратів, а

Тип функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних ННОС	Кількість епох навчання	Мінімальна помилка навчання	Мінімальна помилка контролю
Трикутна	12	0,228	0,452
Трапецієподібна	16	0,511	0,889
Гаусівська 1-го роду	10	0,163	0,312
Гаусівська 2-го роду	11	0,141	0,258
π - типу	22	0,253	0,554

друга (312) – для контролю точності навчання моделей запропонованих спостерігачів ПЗ з різними типами функцій належності лінгвістичних термів. Результати навчання та контролю запропонованої ННОС для різних типів функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних наведені в табл. 2. Проаналізувавши результати вищена-

ведених досліджень можна стверджувати, що найвищої точності в процесі навчання ННОС можна досягти при Гаусівській 2-го роду формі лінгвістичних термів її вхідних змінних (помилка навчання складає 0,141, а помилка контролю – 0,258).

Розглянемо більш детально результати порівняльного аналізу та оцінювання адекватності математичних моделей СЗ ПЕ на основі ННОС із різними типами функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних. Комп'ютерне моделювання (рис. 4) статичних характеристик експериментального ПЕ виконано при $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0,0162$ та $R = 15,51$ мм. На рис. 4 прийнято наступні умовні позначення для статичних характеристик моделей СЗ на основі ННОС із функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних: $F_{\text{прінф}}$ – π -подібного типу; $F_{\text{трап}}$ – типу трапецій; $F_{\text{гаус1}}$ – Гаусівського типу 1-го роду; $F_{\text{гаус2}}$ – Гаусівського типу 2-го роду; $F_{\text{тимф}}$ – трикутного типу; $F_{\text{ехр}}$ – статична характеристика реального ПЕ.

Аналіз адекватності синтезованих математичних моделей СЗ на основі ННОС проведено з використанням методів оцінки гіпотез математичної статистики [5], а саме:

1) сума квадратів помилок (SSE), що показує загальне відхилення значень математичної моделі $F_m(u_{\text{КП}})$ від відповідних значень експериментальних даних $F_e(u_{\text{КП}})$,

$$SSE = \sum_{i=1}^k [F_{ei} - F_{mi}]^2 \rightarrow 0; \quad (12)$$

2) коефіцієнт детермінації R^2 , що є часткою дисперсії відхилень залежної змінної від її середнього значення,

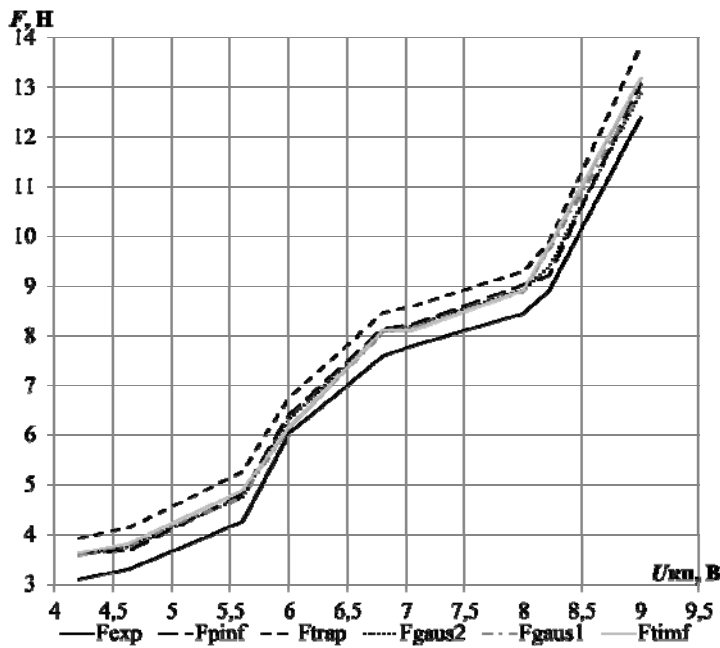


Рис. 4

Тип математичної моделі СЗ на основі ННОС із функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних	SSE	R^2	$RMSE$
трикутного типу	2,926	0,961	0,571
трапецієвидного типу	8,087	0,889	0,948
Гаусівського типу 1-го роду	2,275	0,969	0,503
Гаусівського типу 2-го роду	1,904	0,974	0,461
π - типу	2,241	0,969	0,499

Висновки. Сформовано нейро-нечіткі математичні моделі СЗ для ПЕ на основі ННОС із різними типами функцій належності лінгвістичних термів вхідних змінних (трикутний, трапецієподібний, Гаусівський 1-го роду, Гаусівський 2-го роду, π -типу), які здатні адаптуватися до невизначеностей робочої поверхні і дозволяють попередньо ідентифікувати величину притискового зусилля, що формується перед безпосереднім зчепленням ноги робота з робочою поверхнею в зоні притискового електромагніту та перед виконанням чергового кроку роботом. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання та адекватності розроблених моделей СЗ показав, що найвищу адекватність реальним процесам має модель з Гаусівського типу 2-го роду функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних ННОС ($R^2=0,974$). Запропонований підхід забезпечує підвищення надійності та гарантоспроможності МР і САК МР, адаптивних до невизначеностей ФП, у цілому завдяки визначенню сформованого сумарного ПЗ МР перед виконанням чергового кроку переміщення.

Феноменологія недетермінованої задачі визначення ПЗ, сформованого ПЕ МР під час процесу переміщення, у своїй основі є детермінованою, що дозволяє використання модифікованого підходу на базі класичних рівнянь з теорії поля [1]. Тому в подальшому доцільно направити дослідження на використання отриманих результатів для побудови комп'ютеризованих інформаційно-вимірвальних та керуючих систем МР, здатних переміщуватися по складних поверхнях, з урахуванням природи невизначеностей ФП (феромагнітні або не феромагнітні) з точки зору електромагнітної взаємодії ПЕ з ФП.

1. Герасін О.С., Козлов О.В., Запорожець Ю.М., Кондратенко Ю.П. Розробка підсистеми автоматичного керування притисковим зусиллям для мобільного робота // Матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2016), Суми, 22-23 вересня, 2016. – Суми: Сумський державний університет, 2016. – С. 112–113.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k [F_{ei} - F_{mi}]^2}{\sum_{i=1}^k [F_{ei} - \bar{F}_{ei}]^2} \rightarrow 1, \quad (13)$$

де \bar{F}_{ei} – середнє арифметичне значення дослідної вибірки;

3) корінь із середнього для квадрата помилки ($RMSE$) є оцінкою стандартного відхилення випадкової компоненти між даними синтезованої регресійної моделі та дослідними значеннями

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [F_{ei} - F_{mi}]^2} \rightarrow 0. \quad (14)$$

Результати розрахунків статистичних оцінок адекватності синтезованих математичних моделей спостерігачів ПЗ наведено в табл. 3. На основі цих даних можна зробити висновок, що найкращий результат відповідності експериментальної вибірки має синтезована математична модель на основі ННОС з функціями належності лінгвістичних термів вхідних змінних Гаусівського типу 2-го роду. Для подальшого підвищення точності СЗ під час навчання ННОС необхідно використовувати більшу кількість експериментальних точок.

2. Жучинський Л.А., Свистунов М.В., Стоян С.Л. Пристрій для механічного очищення корпусу судна. Патент України № 63172, 2011.
3. Кондратенко Ю.П., Запорожець Ю.М. Колесо-рушій мобільного робота. Патент України № 45369, 2009.
4. Кондратенко Ю.П., Запорожець Ю.М. Кондратенко В.Ю. Спосіб магнітокерованого переміщення мобільного робота. Патент України № 47369, 2010.
5. Корольок В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятности и математической статистике. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
6. Липківський К.О., Кирик В.В. Застосування Fuzzy Logic регулятора в стабілізаторах змінної напруги // Технічна електродинаміка. Тем. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. – 2000. – С. 43–44.
7. Марков Э.Т. Судовые электрические аппараты. – Л.: Судостроение, 1981. – 344 с.
8. Пересада С.М., Бовкунович В.С., Ковбаса С.Н. Адаптивный наблюдатель Матусе: новый синтез, гарантирующий асимптотичность оценивания вектора потокосцепления и активного сопротивления ротора асинхронного двигателя // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 3. – С. 28–32.
9. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники, ч. III. Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
10. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Липківський К.О., Кирик В.В. FUZZY-системи – новий технологічний інструмент управління // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 3. – С. 17–20.
11. Christensen L., Fischer N., Kroffke S., Lemburg J., Ahlers R. Cost-Effective Autonomous Robots for Ballast Water Tank Inspection // Journal of Ship Production and Design. – 2011. – Vol. 27. – No 3. – Pp. 127–136.
12. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1993. – Vol. 23. – No 3. – Pp. 665–685.
13. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V., Gerasin O.S., Zaporozhets Y.M. Synthesis and research of neuro-fuzzy observer of clamping force for mobile robot automatic control system // Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, August 23-27. – 2016. – Pp. 90–95.
14. Souto D., Faiña A., Deibe A., Lopez-Peña F., Duro R. J. A Robot for the Unsupervised Grit-Blasting of Ship Hulls // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2012. – Vol. 9. – Pp. 1–16.

УДК 62-50+007.52 : 621.318.2

НЕЙРО-НЕЧЁТКИЕ НАБЛЮДАТЕЛИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРИЖИМНОГО УСИЛИЯ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Ю.П. Кондратенко¹, докт.техн.наук, Йоахим Рудольф², докт.техн.наук, А.В. Козлов³, канд.техн.наук, Ю.М. Запорожець¹, канд.техн.наук, А.С. Герасин³

¹ Черноморский национальный университет им. П. Могилы,
ул. 68-ми Десантников, 10, Николаев, 54003, Украина,
e-mail: y_kondrat2002@yahoo.com

² Саарландский университет,
Кампус А5 1, Саарбрюкен, 66123, Германия,

³ Национальный университет кораблестроения им. адм. С.И. Макарова,
пр. Героев Сталинграда, 9, Николаев, 54025, Украина.

Предложены модели наблюдателей для идентификации прижимного усилия магнитоуправляемых движителей мобильных роботов для перемещения по наклонным и вертикальным ферромагнитным поверхностям на основе гибридной нейро-нечеткой вычислительной системы (ННВС) типа ANFIS. Приведены результаты экспериментальных исследований силы отрыва в различных пространственных положениях прижимного магнита относительно ферромагнитной поверхности, что обеспечивает эффективное обучение ННВС, встроенной в систему автоматического управления прижимными усилиями мобильного робота. Проведен сравнительный анализ разработанных наблюдателей с различными типами функций принадлежности. Представлены результаты идентификации формируемого прижимного усилия и результаты анализа адекватности синтезированных моделей наблюдателей. Библиограф. 14, табл. 3, рис. 4.

Ключевые слова: мобильный робот, магнитоуправляемый движитель, электромагнитное поле, прижимной электромагнит, система управления прижимным усилием, нейро-нечеткий наблюдатель.

NEURO-FUZZY OBSERVERS OF CLAMPING FORCE FOR MAGNETICALLY OPERATED MOVERS OF MOBILE ROBOTS

Y.P. Kondratenko¹, Joachim Rudolph², O.V. Kozlov³, Y.M. Zaporozhets¹, O.S. Gerasin³

¹- Petro Mohyla Black Sea National University,
68 Desantnykiv, 10, Mykolaiv, 54003, Ukraine,
e-mail: y_kondrat2002@yahoo.com

²- Saarland University,
Campus A5 1, Saarbrücken, 66123, Germany,

³- National University of Shipbuilding named after admiral S.I. Makarov,
9, Heroiv Stalinhrada ave., Mykolaiv, 54025, Ukraine.

The models of observers for clamping force identification on the basis of ANFIS type hybrid neuro-fuzzy computational system (NFCS) is offered for magnetically operated movers of mobile robots for moving on inclined or vertical ferromagnetic surfaces. The results of experimental investigations of breakaway effort measurements in different spatial positions of clamping magnet relative to the ferromagnetic surface are brought that provides effective training NFCS, built into the clamping force automatic control system of the mobile robot. A comparative analysis of the developed observers with different types of membership functions is performed. Results of formed clamping force identification and an analysis of the adequacy of the observers' synthesized models are presented. References 14, tables 3, figures 4.

Key words: mobile robot; magnetically operated mover; electromagnetic field; clamping electromagnet; clamping force control system; neuro-fuzzy observer.

1. Gerasin O.S., Kozlov O.V., Zaporozhets Y.M., Kondratenko Y.P. The clamping force automatic control subsystem development for a mobile robot // Proceedings of the XXIII International Conference on Automatic Control (Automatics-2016), Sumy, 2016, September, 22-23. – Sumy: Sumy State University, 2016. – Pp. 112–113. (Ukr)
2. Zhuchynskyy L.A., Svystunov M.V., Stoian S.L. Device for mechanical cleaning ship hull. Patent UA No 63172, 2011. (Ukr)
3. Kondratenko Y.P., Zaporozhets Y.M. Propulsion wheel of mobile robot. Patent UA No 45369, 2009. (Ukr)
4. Kondratenko Y.P., Zaporozhets Y.M., Kondratenko V.Y. Method of magnetically operated displacement of mobile robot. Patent UA No 47369, 2010. (Ukr)
5. Korolyuk V.S., Portenko N.I., Skorohod A.V., Turbin A.F. Handbook of probability theory and mathematical statistics. – Moskva: Nauka, 1985. – 640 p. (Rus)
6. Lypkivskyy K.O., Kyryk V.V. Application of Fuzzy Logic controller in AC voltage stabilizers // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”. – 2000. – Pp. 43–44. (Ukr)
7. Markov E.T. Ship electric apparatus. – Leningrad: Sudostroenie, 1981. – 344 p. (Rus)
8. Peresada S.M., Bovkunovich V.S., Kovbasa S.N. Adaptive Matsuse observer: a new synthesis, which guarantees asymptoticity of flux linkage vector estimation and active rotor resistance of asynchronous motor // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2010. – No 3. – Pp. 28–32. (Rus)
9. Polivanov K.M. Theoretical foundations of electrical engineering. Part 3. Electromagnetic field theory. – Moskva: Energiia, 1969. – 352 p. (Rus)
10. Stohnii B.S., Kyrylenko O.V., Lypkivskyy K.O., Kyryk V.V. FUZZY-systems – a new control technological tool // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2001. – No 3. – Pp. 17–20. (Ukr)
11. Christensen L., Fischer N., Kroffke S., Lemburg J., Ahlers R. Cost-Effective Autonomous Robots for Ballast Water Tank Inspection // Journal of Ship Production and Design. – 2011. – Vol. 27. – No 3. – Pp. 127–136.
12. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1993. – Vol. 23. – No 3. – Pp. 665–685.
13. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V., Gerasin O.S., Zaporozhets Y.M. Synthesis and research of neuro-fuzzy observer of clamping force for mobile robot automatic control system // Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, August 23-27, 2016. – Pp. 90–95.
14. Souto D., Faiña A., Deibe A., Lopez-Peña F., Duro R. J. A Robot for the Unsupervised Grit-Blasting of Ship Hulls // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2012. – Vol. 9. – Pp. 1–16.

Надійшла 13.02.2017
Остаточний варіант 13.06.2017