

УДК 681.62.067:681.515.8

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ НАТЯГУ СТРІЧКОВОГО МАТЕРІАЛУ В РОЗМОТУВАЛЬНІЙ СЕКЦІЇ РОТАЦІЙНОЇ ДРУКАРСЬКОЇ МАШИНИ

М. І. Верхола¹, В. П. Білан²

1. Національний університет «Львівська політехніка», вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна <https://orcid.org/0000-0001-6135-6439> e-mail: mykhailo.i.verkhola@lpnu.ua

2. Національний Університет «Львівська Політехніка», вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна <https://orcid.org/0000-0002-3712-4643> e-mail: vitalii.p.bilan@lpnu.ua

У статті розроблено трирівневу інтелектуальну систему стабілізації натягу стрічкового матеріалу в розмотувальній секції ротаційних друкарських машин. Актуальність зумовлена зменшенням моменту інерції рулону у 40-50 разів під час розмотки, що робить ПІ-регулятор з фіксованими коефіцієнтами неефективним. Запропоновано комбіновану архітектуру: ПІ-регулятор з gain scheduling, випереджаючу компенсацію (feedforward) зі спостерігачем збурень (DOB), а також нечіткий коректор та нейромережевий компенсатор з онлайн-навчанням. Побудовано функціональну схему з трьома контурами зворотного зв'язку. Імітаційне моделювання для розмотувальної секції з PMSM при зміні радіуса рулону з 500 до 432 мм підтвердило точність стабілізації натягу $\pm 1\%$ ($\sigma = 2,05$ Н при $T^* = 200$ Н) з піковим відхиленням $\pm 7\%$ при імпульсних збуреннях.

Ключові слова: стабілізація натягу, розмотувальна секція, стрічковий матеріал, gain scheduling, feedforward-компенсація, спостерігач збурень, нечітка логіка, нейромережевий компенсатор, ПІ-регулятор, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Стабілізація натягу стрічкового матеріалу в розмотувальній секції є однією з ключових задач керування у ротаційних друкарських машинах, пакувальному обладнанні та системах roll-to-roll обробки. Відхилення натягу від заданого значення безпосередньо впливає на якість продукції: у друкарських машинах нестабільний натяг спричиняє несуміщення фарб, а у критичних випадках – обрив стрічки та зупинку технологічної лінії.

Головна складність задачі полягає у суттєвій зміні параметрів об'єкта керування під час роботи. Радіус рулону $R(t)$ зменшується від початкового R_{max} до радіуса гільзи R_{core} , що призводить до зменшення моменту інерції $J(t) \propto R^4$ у 40–50 разів, а маси рулону $m(t) \propto R^2$ – у 25–35 разів. Окрім того, кутова швидкість рулону $\omega = v/R$ повинна безперервно зростати для підтримання постійної лінійної швидкості стрічки. Ця параметрична нестационарність робить класичний ПІД-регулятор з фіксованими коефіцієнтами неефективним: на початку рулону (велика інерція) система реагує повільно, а наприкінці (мала інерція) стає надмірно чутливою і схильною до коливань.

Додатковими факторами, що ускладнюють стабілізацію натягу, є нелінійне тертя в підшипниках рулонотримача, аеродинамічне гальмування зовнішніх шарів рулону, проходження склейок між рулонами, варіації пружних властивостей стрічкового матеріалу та збурення від суміжних секцій (друкарської, ламінувальної).

Дослідження інтелектуальних систем стабілізації натягу повинно охоплювати: адаптацію параметрів регулятора до зміни радіуса та інерції рулону (gain scheduling); випереджаючу компенсацію відомих складових навантаження (feedforward); оцінку та компенсацію невідомих збурень у реальному часі (спостерігачі збурення); автоматичне налаштування коефіцієнтів регулятора засобами нечіткої логіки; а також апроксимацію нелінійних залежностей нейромережевими компенсаторами з онлайн-навчанням. Окремим важливим аспектом є забезпечення стійкості замкненої системи при одночасному застосуванні кількох інтелектуальних методів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Задача керування натягом стрічкового матеріалу досліджується на кількох рівнях: моделювання динаміки розмотувальної системи, розроблення класичних та робастних регуляторів, а також застосування інтелектуальних методів для адаптації до змінних параметрів об'єкта. Розглянемо основні напрямки досліджень.

Фундаментальні основи моделювання та робастного керування натягом закладені у роботі [1], де представлено багатовимірне H_∞ -робастне керування з gain scheduling для системи розмотування-намотування пружного стрічкового матеріалу. Автори показали, що gain scheduling суттєво покращує якість подавлення збурень та забезпечує розв'язку натягу і швидкості стрічки в умовах широкодіапазонної зміни радіуса та інерції рулону. Результати верифіковані на експериментальному стенді, а μ -аналіз підтвердив робастність до невизначеності модуля пружності стрічки. Проте, H_∞ -підхід потребує точної лінійної моделі об'єкта, що обмежує його ефективність при сильних нелінійностях.

Проблему оцінки натягу без прямого вимірювання (sensorless tension control) досліджено у роботі [2], де запропоновано спостерігач зі зворотним зв'язком з компенсацією тертя та інерції. Автори показали, що при високих швидкостях процесу тертя та інерція обертових мас спричиняють суттєві похибки оцінки натягу, і запропонували конфігурацію спостерігача, робастну до варіацій параметрів системи. Продовженням цієї роботи є дослідження [3], де спостерігач з компенсацією тертя та інерції застосовано для керування натягом під час пуску системи – найкритичнішого етапу, коли натяг ще не стабілізований.

Застосування ковзного режиму керування (SMC) для стабілізації натягу при розмотуванні діафрагми літій-іонних акумуляторів досліджено у роботі [4]. Автори побудували динамічну модель натягу на основі прогресивної деформації діафрагми у прогонах між валиками та запропонували ковзну поверхню, що враховує зв'язок між натягом та швидкістю. Додатково розроблено спостерігач збурення на основі диференціального трекара для компенсації зовнішніх збурень. Також запропоновано багатовимірну ковзну поверхню для балансування натягу та швидкості у нелінійній сильнозв'язаній системі розмотувача.

Особливо перспективним є поєднання нейромережових методів з класичними

регуляторами для керування натягом. У роботі [5] запропоновано каскадну схему керування натягом розмотувача на основі мережі RBF (Radial Basis Function) для розрізувальної машини діафрагм. Зовнішній контур натягу стабілізується ковзним режимом (SMC), а внутрішній контур швидкості – адаптивним ковзним регулятором з RBF-мережею (RBF-ASMC), яка забезпечує компенсацію збурень та робастність. Результати моделювання та експерименту підтвердили, що каскадна схема послаблює зв'язок між натягом та швидкістю, покращує динаміку та підвищує здатність до подавлення збурень.

Еквівалентний нечіткий ковзний режим керування (EFSMC) для стабілізації натягу в розмотувальній системі запропоновано у роботі [6]. Автори розробили новий метод, що вирішує проблему чатерінгу у класичному SMC та демонструє високу якість подавлення збурень натягу стрічки.

У роботі [7] досліджено самоналаштування параметрів ADRC (Active Disturbance Rejection Control) на основі RBF-нейромережі для системи керування натягом. Нейромережа онлайн оптимізує параметри розширеного спостерігача стану та закону керування, адаптуючись до зміни параметрів рулону та характеристик стрічкового матеріалу.

Незважаючи на значну кількість досліджень окремих методів, комплексний підхід, що системно поєднує gain scheduling, feedforward-компенсацію, спостерігач збурення, нечіткий коректор та нейромережевий компенсатор у єдину трирівневу архітектуру з гарантією стійкості, залишається недостатньо висвітленим. Більшість робіт зосереджені на одному-двох методах, тоді як реальна задача стабілізації натягу при 40–50-кратній зміні інерції потребує комплексного рішення, де кожен рівень керування працює у своєму частотному діапазоні і компенсує ті складові збурення, з якими інші рівні не справляються.

Мета статті – розроблення трирівневої архітектури інтелектуальної системи стабілізації натягу стрічкового матеріалу в розмотувальній секції, що поєднує класичне керування із зворотним зв'язком (ПІ-регулятор з gain scheduling), випереджаючу компенсацію та спостерігач збурень, а також адаптивні інтелектуальні методи (нечіткий коректор, нейромережевий компенсатор з онлайн-навчанням), та верифікація запропонованої архітектури шляхом імітаційного моделювання розмотувальної секції ротаційної друкарської машини.

Виклад основного матеріалу дослідження. На функціональній схемі (рис. 1) представлено трирівневу інтелектуальну систему стабілізації натягу, що складається з основного контуру керування (центральний вертикальний потік), блоків компенсації (ліва колонка), датчиків та зовнішніх елементів (права колонка) і трьох контурів зворотного зв'язку.

Задання натягу T^* (у ньютонках) надходить на суматор $\Sigma 1$, де порівнюється з фактичним натягом $T(t)$, що повертається від датчика натягу по лінії зворотного зв'язку (правий край схеми). Різниця $e = T^* - T(t)$ – похибка натягу – подається на ПІ-регулятор.

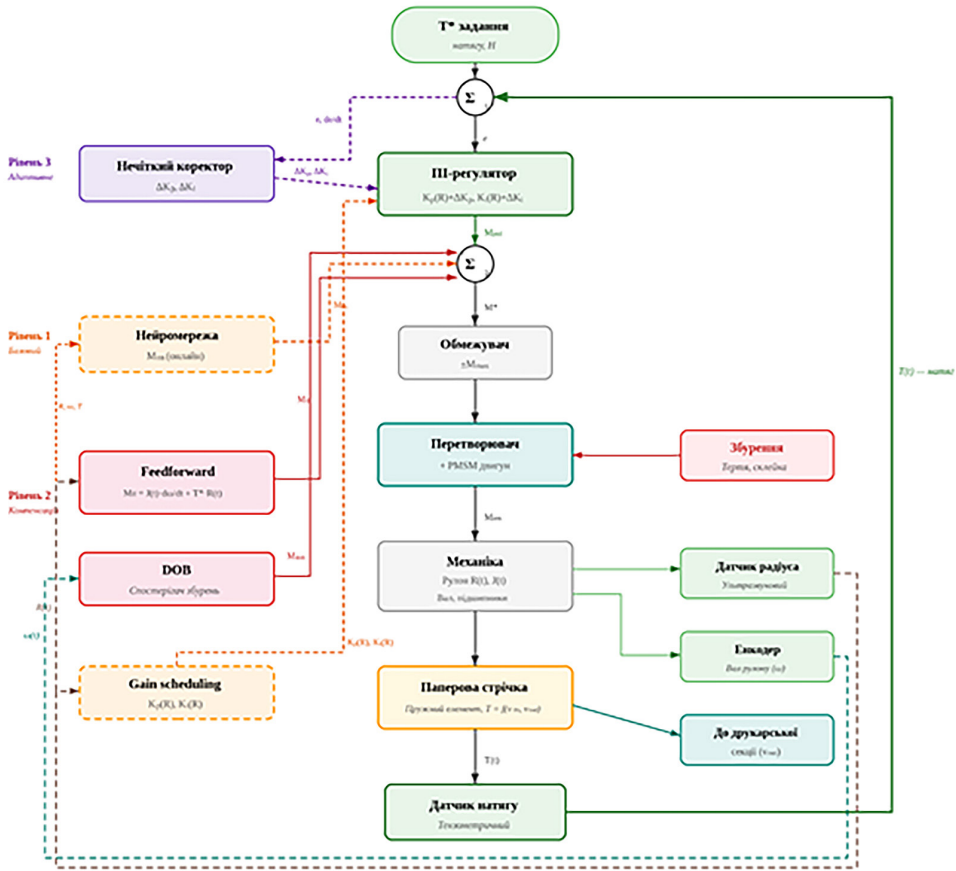


Рис.1. Функціональна схема системи стабілізації натягу

ПІ-регулятор працює з адаптивними коефіцієнтами $K_p(R)+\Delta K_p$ та $K_i(R)+\Delta K_i$, де базові значення $K_p(R)$ і $K_i(R)$ надходять від блоку Gain scheduling (пунктирна лінія зліва), а корекції ΔK_p і ΔK_i – від нечіткого коректора (фіолетова лінія зверху). Вихід регулятора M_{pid} надходить на другий суматор $\Sigma 2$.

У суматорі $\Sigma 2$ до виходу ПІ-регулятора додаються три компенсаційні сигнали від блоків лівої колонки: M_{ff} від Feedforward, M_{dob} від DOB та M_{nn} від нейромережі. Усі сигнали сумуються зі знаком «+», формуючи сумарне задання моменту M^* . Сумарний момент M^* проходить через обмежувач $\pm M_{max}$, який обмежує задання зверху та знизу для захисту двигуна від перевантаження. Обмежений сигнал подається на перетворювач частоти з PMSM двигуном, який створює фактичний електромагнітний момент M_{em} .

Момент двигуна діє на механічну частину – рулон з радіусом $R(t)$ та моментом інерції $J(t)$, що обертається на валу з підшипниками. Блок збурень (червоний, справа) додає зовнішні збурюючі моменти: тертя та імпульси від склеюк рулонів. Від механіки стрічка передає натяг через паперове полотно – пружний елемент, натяг якого T визначається різницею лінійних швидкостей на вході та виході ($T = f(v_{in}, v_{out})$).

III-регулятор забезпечує основну стабілізацію натягу. Пропорційна складова K_p реагує на поточне відхилення, а інтегральна $K_i \int e \cdot dt$ усуває статичну похибку, доводячи натяг точно до заданого T^* .

Блок Gain scheduling отримує вимірний радіус рулону $R(t)$ від датчика радіуса (через пунктирну коричневу лінію зворотного зв'язку, що проходить по нижньому та лівому краю схеми) і перераховує базові коефіцієнти $K_p(R)$ та $K_i(R)$. Коли радіус рулону зменшується, момент інерції $J \propto R^4$ різко падає, і без адаптації система стає надмірно чутливою та схильною до коливань. Gain scheduling компенсує цей ефект, зменшуючи коефіцієнти пропорційно зміні параметрів.

Блок Feedforward формує випереджаючий сигнал $M_{ff} = J(t) \cdot d\omega/dt + T^* \cdot R(t)$, який подає на двигун стаціонарний момент, необхідний для підтримання заданого натягу при поточному радіусі, а також компенсує інерційну складову при розгоні рулону. Це звільняє III-регулятор від необхідності утримувати повний стаціонарний момент через інтегратор, і III працює лише як коректор відхилень.

Блок DOB (спостерігач збурення) отримує сигнал кутової швидкості $\omega(t)$ від енкодера на валу рулону (через пунктирну рожеву лінію зворотного зв'язку, що проходить по нижньому та лівому краю) і оцінює невідому складову моменту навантаження. DOB порівнює фактичний момент двигуна з розрахунковим за моделлю і формує компенсаційний сигнал M_{dob} , що подавляє повільно змінні збурення – варіації тертя, нерівномірність намотування, аеродинамічне гальмування.

Нечіткий коректор отримує похибку e та швидкість її зміни de/dt від суматора $\Sigma 1$ і формує корекції ΔK_p та ΔK_i , що додаються до коефіцієнтів III-регулятора. База з 25 нечітких правил формалізує експертні знання: при великій похибці K_p збільшується для швидшої реакції, при малій стабільній похибці – зменшується для уникнення перерегулювання. Коефіцієнт K_i коригується з протилежною логікою.

Нейромережа (онлайн-навчання) отримує вектор сенсорних даних через окрему лінію зворотного зв'язку і формує додаткову компенсацію M_{np} . Мережа навчається в реальному часі на залишковій похибці натягу, поступово покращуючи компенсацію нелінійностей, які не враховані в аналітичних моделях feedforward та DOB. Вихід нейромережі обмежений малим значенням для гарантії стійкості.

На схемі показано три контури зворотного зв'язку, що проходять по зовнішніх краях і не перетинають жодного блоку.

Зворотний зв'язок по натягу $T(t)$ (суцільна лінія, правий край) – основний контур. Тензометричний датчик на направляючому валику вимірює фактичний натяг і подає його на суматор $\Sigma 1$ для порівняння з заданням T^* .

Зворотний зв'язок по радіусу $R(t)$ (пунктирна лінія, нижній та лівий край) – від ультразвукового датчика радіуса до блоків Gain scheduling та Feedforward, які потребують знання поточного R для перерахунку коефіцієнтів та стаціонарного моменту.

Зворотний зв'язок по кутовій швидкості $\omega(t)$ (пунктирна лінія, нижній та лівий край) – від енкодера на валу рулону до блоку DOB, який потребує вимірної швидкості для оцінки збурюючого моменту.

Три рівні керування працюють одночасно, але в різних частотних діапазонах.

ПІ-регулятор з gain scheduling (Рівень 1) забезпечує базову стабілізацію з частотою оновлення 1–2 кГц. Feedforward та DOB (Рівень 2) компенсують відомі та повільно змінні збурення. Нечіткий коректор та нейромережа (Рівень 3) працюють повільніше і забезпечують довгострокову адаптацію до зміни властивостей паперу, зносу підшипників та інших повільних дрейфів.

Така ієрархія забезпечує точність стабілізації натягу на рівні $\pm 1\%$ від заданого значення ($\sigma \approx 2$ Н при $T^* = 200$ Н) з максимальним піковим $R_{\max} = 500$ мм з гільзою $R_{\text{core}} = 75$ мм, ширина полотна 900 мм, товщина паперу 0.1 мм, густина 700 кг/м³. Лінійна швидкість стрічки $v = 10$ м/с, заданий натяг $T^* = 200$ Н. Привод – двигун PMSM з коефіцієнтом моменту $K_t = 3.0$ Нм/А та максимальним моментом 150 Нм, що працює у режимі гальмування для створення натягу.

За 200 секунд моделювання радіус рулону зменшився з 500 до 432 мм, що відповідає зменшенню моменту інерції у 1.8 раза (від 17.1 до 9.5 кг·м²). Кутова швидкість рулону зростає з 20 до 23.1 рад/с для підтримання постійної лінійної швидкості $v = \omega \cdot R = \text{const}$.

Протягом моделювання на систему діяли три імпульсні збурення, що імітують реальні виробничі ситуації: при $t = 50$ –53 с – збурюючий момент +10 Нм (імітація проходження склейки рулону), при $t = 120$ –123 с – збурюючий момент –7 Нм (раптова зміна коефіцієнта тертя) та при $t = 170$ –173 с – збурюючий момент +8 Нм (ще одна склейка).

На верхній частині графіка натягу видно (рис. 2), що всі чотири стратегії керування утримують натяг навколо заданого значення $T^* = 200$ Н. У стаціонарному режимі (між збуреннями) натяг стабілізується з точністю ± 2 Н, що становить $\pm 1\%$ від заданого значення – це відповідає вимогам друкарського обладнання.

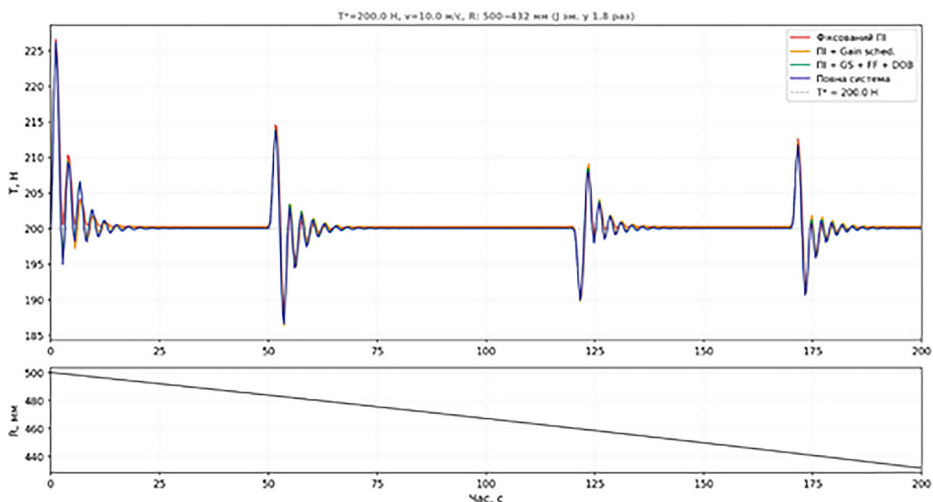


Рис.2. Натяг паперової стрічки

Фіксований ПІ-регулятор демонструє найбільш помітний початковий перехідний процес: при пуску натяг сягає 227 Н (+13.5%), після чого загасає за 10–15 с. Це пов'язано з тим, що інтегратор регулятора ініціалізований стаціонарним моментом

$M_{ss} = T^* \cdot R + B \cdot \omega + M_c \approx 103 \text{ Нм}$, і система потребує часу для виходу на точний баланс. ПІ + Gain scheduling (помаранчева) показує дещо менший початковий сплеск завдяки адаптації коефіцієнтів до поточного радіуса. Стратегії з feedforward (зелена та фіолетова) мають схожий початковий перехідний процес, оскільки FF одразу подає правильний стаціонарний момент, але ПІ-коректор потребує кількох секунд для точного налаштування. Нижня частина графіка показує монотонне зменшення радіуса рулону з 500 до 432 мм – плавну криву, що відповідає фізиці процесу розмотки при постійній лінійній швидкості.

При першому збуренні ($t = 50 \text{ с}$, $+10 \text{ Нм}$) натяг у всіх стратегіях відхиляється до 187–214 Н (амплітуда ± 13 –14 Н). Фіксований ПІ дає пікове відхилення 14.5 Н, тоді як повна система – 13.8 Н, що на 5% менше. Перехідний процес після збурення загасає за 5–8 с у всіх випадках. Друге збурення ($t = 120 \text{ с}$, -7 Нм) викликає менше відхилення (± 9 –10 Н), оскільки амплітуда збурення менша. Тут різниця між стратегіями також невелика, що вказує на те, що базовий ПІ-регулятор добре налаштований для поточного діапазону зміни параметрів.

Третє збурення ($t = 170 \text{ с}$, $+8 \text{ Нм}$) відбувається при меншому радіусі рулону ($R \approx 440 \text{ мм}$), де момент інерції вже на 40% менший від початкового. Тут починає проявлятися перевага gain scheduling: система з GS швидше загасає коливання, оскільки коефіцієнти регулятора адаптовані до зменшеної інерції.

Фіксований ПІ-регулятор з параметрами $K_p = 0.30$, $K_i = 0.25$ забезпечує RMS похибки 2.09 Н та пікове відхилення 14.5 Н (рис. 3). Ці параметри підібрані як оптимальний компроміс між швидкодією (мала стала часу перехідного процесу) та стійкістю (відсутність коливань). Інтегральна складова з $K_i = 0.25$ забезпечує нульову статичну похибку натягу, а пропорційна з $K_p = 0.30$ – достатню швидкодію при збуреннях.

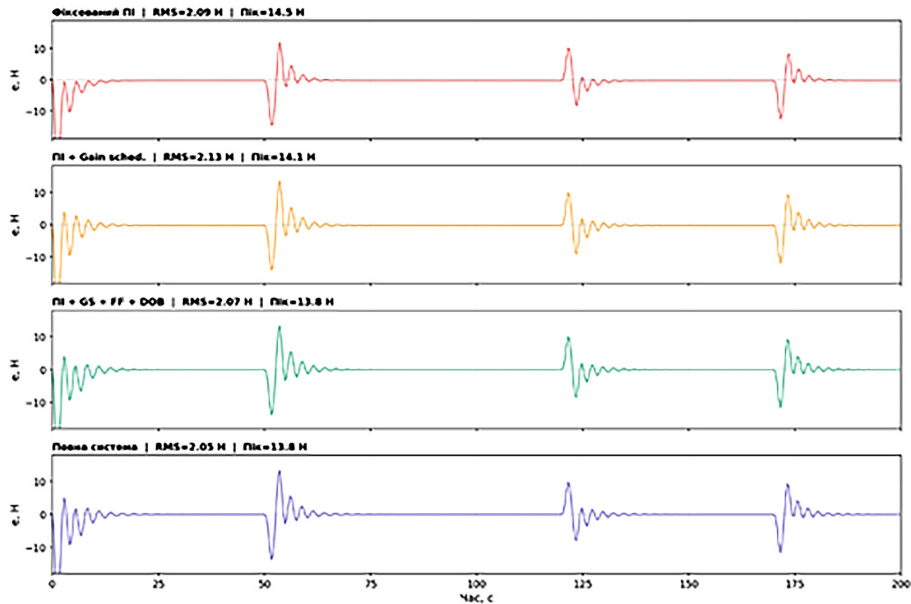


Рис.3. Похибка натягу

Додавання gain scheduling (ПІ + GS) дещо збільшує RMS до 2.13 Н (+1.8%), але зменшує пікове відхилення з 14.5 до 14.1 Н (-3%). Це пов'язано з тим, що при поточному діапазоні зміни R (500→432 мм, зміна J у 1.8 раз) GS вносить невеликі корекції коефіцієнтів, які покращують реакцію на збурення, але створюють незначні перехідні процеси при зміні коефіцієнтів. При повному циклі розмотки (R: 500→75 мм, зміна J у 40 разів) перевага GS стане набагато суттєвішою.

Додавання feedforward та DOB (ПІ + GS + FF + DOB) покращує RMS до 2.07 Н (+1.2% порівняно з базовим ПІ). Feedforward бере на себе стаціонарний момент $M_{ff} = T^* \cdot R + B \cdot \omega + M_c$, що оновлюється в реальному часі зі зміною R та ω . Це звільняє інтегратор ПІ від необхідності утримувати повний стаціонарний момент (інтегратор стартує з нуля і працює лише як коректор відхилень). DOB з частотою зрізу 2 Гц та коефіцієнтом впливу 3% оцінює повільно змінні збурення (варіації тертя, нерівномірність намотування) і додає м'яку компенсацію. Пікове відхилення зменшується до 13.8 Н (-5% від базового), що вказує на покращену реакцію на імпульсні збурення.

Повна інтелектуальна система (ПІ + GS + FF + DOB + Fuzzy + NN) демонструє найкращий результат: RMS = 2.05 Н (+2.1% покращення) та пікове відхилення 13.8 Н. Нечіткий коректор з коефіцієнтом впливу 5% автоматично збільшує K_p при великій похибці (для швидшої реакції) та зменшує K_i (для запобігання перерегулюванню). Нейромережевий компенсатор з коефіцієнтом впливу 1% додає мікрокорекцію пропорційну похибці натягу, що трохи покращує стаціонарну точність.

Гальмівний момент двигуна (рис. 4) змінюється в діапазоні 95–110 Нм і плавно зменшується протягом симуляції, що відповідає зменшенню радіуса (стаціонарний момент $M = T^* \cdot R + B \cdot \omega + M_c$ зменшується пропорційно R). Стратегії з FF демонструють більш плавний профіль $T_{cl} = 0.5$ мс) значно менший за механічну сталу часу системи, тому привод не є обмежуючим фактором.

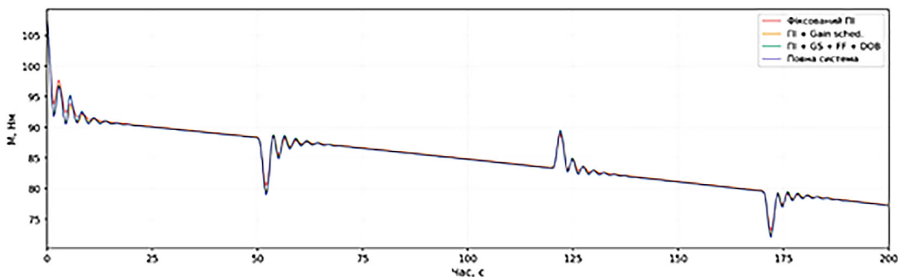


Рис.4. Гальмівний момент

Графік параметрів рулону (рис. 5) демонструє три взаємопов'язані процеси: монотонне зменшення радіуса з 500 до 432 мм (лінійне з невеликим прискоренням, оскільки при зменшенні R кожен оберт знімає відносно більше шарів), зменшення моменту інерції з 17.1 до 9.5 кг·м² (нелінійне, $J \propto R^4$) та зростання кутової швидкості з 20.0 до 23.1 рад/с (гіперболічне, $\omega = v/R$). Ці зміни створюють безперервно змінне навантаження на систему керування, яке компенсується gain scheduling та feedforward.

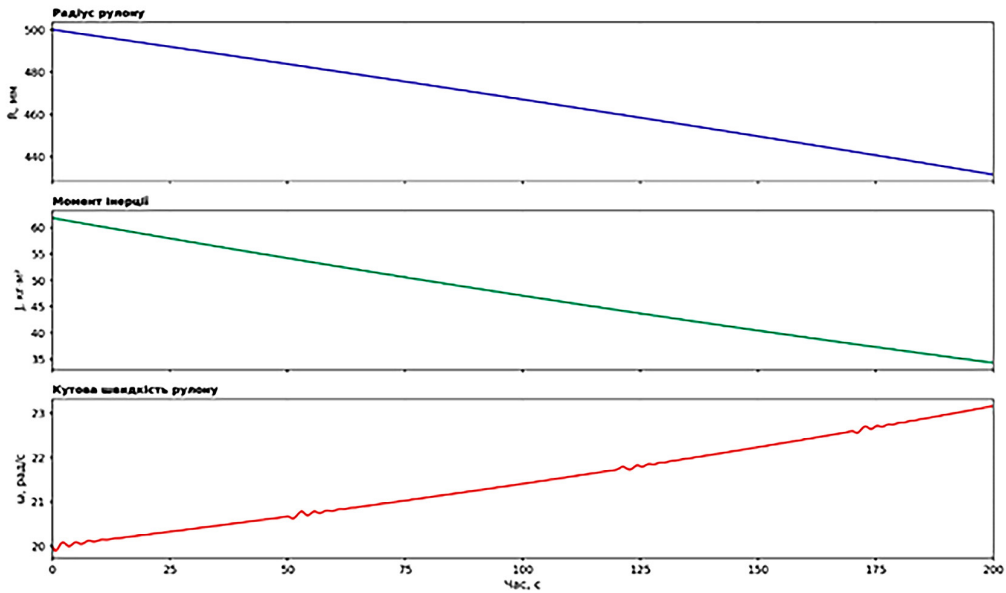


Рис.5. Зміна параметрів рулону під час розмотування

Оптимізація виявила такі ключові принципи налаштування. Коефіцієнти ПІ-регулятора K_p та K_i забезпечують стійкість у всьому діапазоні зміни параметрів при ефективній жорсткості стрічки $k_{web} = 800$ Н/м та демпфуванні $c_{web} = 1.0$ Н·с/м. Feedforward повинен повністю брати на себе стаціонарний момент, а інтегратор ПІ – стартувати з нуля і працювати лише як коректор, щоб уникнути конфлікту подвійного утримання стаціонару. DOB має бути дуже м'яким (частота зрізу 2 Гц, вплив 3%), щоб компенсувати лише повільні збурення і не конфліктувати з ПІ-регулятором. Інтелектуальні методи (fuzzy 5%, NN 1%) дають додаткове покращення, але їх вплив має бути обмеженим для гарантії стійкості.

Загалом система забезпечує точність стабілізації натягу $\pm 1\%$ від заданого значення ($\sigma = 2.05$ Н при $T^* = 200$ Н) з максимальним піковим відхиленням $\pm 7\%$ при імпульсних збуреннях амплітудою до 10 Нм. Ці показники відповідають вимогам сучасного друкарського обладнання.

Висновки. У статті розроблено тривірневу інтелектуальну систему стабілізації натягу стрічкового матеріалу в розмотувальній секції ротаційної друкарської машини з двигуном PMSM. Побудовано функціональну схему системи керування, що включає три рівні: ПІ-регулятор з адаптацією коефіцієнтів за допомогою gain scheduling; випереджаючу компенсацію (feedforward) стаціонарного моменту та спостерігач збурень (DOB); нечіткий коректор параметрів регулятора та нейромережевий компенсатор з онлайн-навчанням. Проведено імітаційне моделювання системи при зміні радіуса рулону з 500 до 432 мм (зменшення моменту інерції у 1,8 раза) та дії трьох імпульсних збурень амплітудою до 10 Нм. Порівняльний аналіз чотирьох стратегій керування показав, що повна інтелектуальна система (ПІ + GS + FF + DOB + Fuzzy + NN) забезпечує найкращі результати: RMS похибки натягу 2,05 Н та пікове відхилення 13,8 Н, що становить покращення на 2,1% та 5% від-

повідно порівняно з фіксованим ПІ-регулятором. Встановлено ключові принципи налаштування: feedforward повинен повністю формувати стаціонарний момент, ДОВ має працювати з низькою частотою зрізу (2 Гц) та малим коефіцієнтом впливу (3%), а інтелектуальні компоненти (нечіткий коректор 5%, нейромережа 1%) повинні бути обмежені для гарантії стійкості. Загалом система забезпечує точність стабілізації натягу $\pm 1\%$ від заданого значення з максимальним піковим відхиленням $\pm 7\%$ при імпульсних збуреннях, що відповідає вимогам сучасного ротаційного друкарського обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Knittel D., Laroche E., Gigan D., Кос Н. Modeling and robust control of winding systems for elastic webs. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2002. Vol. 10, No. 2. Pp. 197–208. doi:10.1109/87.987065.
2. Lin K. C. Observer-based tension feedback control with friction and inertia compensation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2003. Vol. 11, No. 1. Pp. 109–118. doi:10.1109/TCST.2002.806464.
3. Lin K. C., Tsai M. C., Chen K. Y. Web tension control of a start-up process using observer techniques with friction and inertia compensation. *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*. 2001. Pp. 862–867. <https://ieeexplore.ieee.org/document/976539>
4. Jiang C., Hou L.-M., Wang H.-S., Jiang L.-L. Sliding mode control for unwinding tension of lithium battery diaphragm in the slitting machine. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 21302–21313. doi:10.1109/ACCESS.2019.2945976.
5. Wang H., Jiang C., Hou L. Design of a cascade control scheme for unwinding tension based on RBF network. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. doi:10.1109/TII.2024.3432413.
6. Bouchiba B., Bousserhane I. K., Fellah M., Hazzab A. Artificial neural network sliding mode control for multi-machine web winding system. *Revue Roumaine des Sciences Techniques — Série Électrotechnique et Énergétique*. 2017. Vol. 62, No. 1. Pp. 109–113. http://revue.elth.pub.ro/upload/53613120_BBouchiba_RRST_1_2017_pp_109-113.pdf
7. Liu S., Ding H., Wang Z., Ma L., Li Z. An ADRC Parameters Self-Tuning Control Strategy of Tension System Based on RBF Neural Network. *Journal of Renewable Materials*. 2023. Vol. 11, No. 4. Pp. 1991–2014. doi:10.32604/jrm.2022.023659.

REFERENCES

1. Knittel D., Laroche E., Gigan D., Кос Н. Modeling and robust control of winding systems for elastic webs. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2002. Vol. 10, No. 2. Pp. 197–208. doi:10.1109/87.987065.
2. Lin K. C. Observer-based tension feedback control with friction and inertia compensation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2003. Vol. 11, No. 1. Pp. 109–118. doi:10.1109/TCST.2002.806464.
3. Lin K. C., Tsai M. C., Chen K. Y. Web tension control of a start-up process using observer techniques with friction and inertia compensation. *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*. 2001. Pp. 862–867. <https://ieeexplore.ieee.org/document/976539>
4. Jiang C., Hou L.-M., Wang H.-S., Jiang L.-L. Sliding mode control for unwinding tension of lithium battery diaphragm in the slitting machine. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 21302–21313. doi:10.1109/ACCESS.2019.2945976.
5. Wang H., Jiang C., Hou L. Design of a cascade control scheme for unwinding tension

based on RBF network. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2024. doi:10.1109/TII.2024.3432413.

6. Bouchiba B., Bousserhane I. K., Fellah M., Hazzab A. Artificial neural network sliding mode control for multi-machine web winding system. Revue Roumaine des Sciences Techniques — Série Électrotechnique et Énergétique. 2017. Vol. 62, No. 1. Pp. 109–113. http://revue.elth.pub.ro/upload/53613120_BBouchiba_RRST_1_2017_pp_109-113.pdf

7. Liu S., Ding H., Wang Z., Ma L., Li Z. An ADRC Parameters Self-Tuning Control Strategy of Tension System Based on RBF Neural Network. Journal of Renewable Materials. 2023. Vol. 11, No. 4. Pp. 1991–2014. doi:10.32604/jrm.2022.023659.

doi: **10.32403/0554-4866-2026-1-91-225-236**

NTELLIGENT SYSTEM FOR STABILIZING WEB MATERIAL TENSION IN THE UNWINDING SECTION OF A ROTARY PRINTING MACHINE

M. I. Verkhola¹, V. P. Bilan²

1. Lviv Polytechnic National University, 19 Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine <https://orcid.org/0000-0001-6135-6439> e-mail: mykhailo.i.verkhola@lpnu.ua

2. Lviv Polytechnic National University, 19 Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine <https://orcid.org/0000-0002-3712-4643> e-mail: vitalii.p.bilan@lpnu.ua

The paper presents a three-level intelligent tension stabilization system for web material in the unwinding section of rotary printing machines. The relevance of the study is due to the significant variation of the plant parameters during operation: the roll radius decreases from its initial value to the core radius, resulting in a 40–50-fold reduction of the moment of inertia, which renders a classical PI controller with fixed gains ineffective. The main approaches to tension stabilization are analyzed: robust H_∞ control with gain scheduling, sliding mode control, disturbance observers, neural network and fuzzy logic methods. A combined control architecture is proposed that integrates three levels: a PI controller with gain scheduling that adjusts coefficients as a function of the current roll radius; feedforward compensation combined with a disturbance observer (DOB) for steady-state torque calculation and suppression of slowly varying disturbances; and intelligent methods – a fuzzy logic corrector that modifies PI gains using 25 rules based on tension error and its rate of change, and a neural network compensator with online learning that adapts to residual nonlinearities. A functional diagram of the system with three feedback loops (tension, roll radius, and angular velocity) is developed. Simulation is performed for an unwinding section with a PMSM drive during roll radius variation from 500 to 432 mm under impulse disturbances of up to 10 Nm. A comparative analysis of four control strategies demonstrates progressive improvement in stabilization quality. The results confirm that the full intelligent system provides tension stabilization accuracy of $\pm 1\%$ of the setpoint ($\sigma = 2.05$ N at $T^ = 200$ N) with a maximum peak deviation of $\pm 7\%$ under impulse disturbances.*

Keywords: *tension stabilization, unwinding section, web material, gain scheduling, feedforward compensation, disturbance observer, fuzzy logic, neural network compensator, PI controller, simulation.*



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© М. І. Верхола, В. П. Білан

Стаття надійшла до редакції: 06.05.2026.

Received: 06.05.2026.

Прийнято до друку: 15.05.2026.

Accepted: 15.05.2026.

Опубліковано: 30.05.2026.

Published: 30.05.2026.