

ISSN 1998-7927(print) ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-300-2-19-27>

УДК 655.3.021:621.313:681.5

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ АДАПТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК НЕПРИВЕДЕННЯ ДРУКУ НА ОСНОВІ КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ РУЛОННИХ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН

Зенкін М.А., Іванко А.І., Шимко Б.В.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ADAPTIVE COMPENSATION OF PRINT MISREGISTRATION ERRORS BASED ON DRIVE CONTROL OF WEB PRINTING PRESSES

Zenkin M.A., Ivanko A.I., Shymko B.V.

Метою статті є розроблення та експериментальна перевірка методів адаптивної компенсації похибок неприведення друку шляхом активного керування приводами рулонних машин. Дослідження спрямоване на зниження амплітуди MD та CD-відхилень у перехідних і сталих режимах роботи обладнання. Методологія базується на поєднанні математичного моделювання міжсекційної динаміки та експериментальної ідентифікації параметрів. Побудовано узагальнену модель взаємодії «привід – натяг – позиційна похибка» з урахуванням інерційності, еластичності полотна та люфтів передач. Для оцінювання стану використано сигнали енкодерів і тензодатчиків, які реєстрували з частотою 1 кГц. Параметри моделі визначено методом найменших квадратів на основі реальних вимірювань фазових зсувів. Розроблено алгоритм онлайн-оцінювання похибки та формування коригуючих впливів на швидкість і фазу валів. Адаптивний регулятор враховує міжсекційні зв'язки та обмеження приводів. Експериментальні випробування проведено на чотирисекційній рулонній машині формату 820 мм із сервоприводами 7,5 кВт. У режимі розгону без компенсації максимальна похибка становила 0,038 мм. Після активації алгоритму її зменшено до 0,017 мм. Час встановлення скоротився з 126 до 78 мс у номінальному режимі. Інтегральний критерій коливань знизився на 43 %. Під час збурення натягу на 20 Н система відновлювала синхронізацію за 95 мс. За імпульсного моменту 6 Н·м перерегулювання не перевищило 4,1 %. Тривалий тираж підтвердив стабільність похибки в межах 0,014 мм без ручного втручання оператора. Практична цінність полягає в

можливості інтеграції алгоритму в промислові ПЛК через мережу EtherCAT без зміни механічної структури машини. Запропонований підхід знижує рівень браку та підвищує точність синхронізації секцій. Наукова новизна полягає у комплексному поєднанні моделі міжсекційної динаміки та адаптивного керування, що враховує реальні параметри приводу і натягу полотна. Отримані результати підтверджують ефективність методів компенсації для серійного застосування у рулонних друкарських машинах.

Ключові слова: рулонна друкарська машина; похибка неприведення; адаптивна компенсація; міжсекційний зв'язок; сервоприводне керування; фазова синхронізація.

Вступ. Рулонні друкарські машини працюють у режимі багатосекційної синхронізації. Якість суміщення фарб визначає точність позиціонування формних циліндрів. Під час розгону та зміни навантаження виникають фазові зсуви. Нерівномірність натягу полотна змінює геометричний крок зображення. Люфти передач і інерційність приводів формують додаткове запізнення. Навіть відхилення на десятки мікрометрів знижують якість відбитка. Промислові системи керування забезпечують стабілізацію швидкості, проте не враховують повну міжсекційну взаємодію. Статичні налаштування регуляторів втрачають ефективність при зміні режимів роботи [1]. Тому необхідне впровадження алгоритмів,

здатних адаптувати параметри в реальному часі. Такі рішення мають враховувати динаміку полотна, механічні зазори та збурення моменту.

Підвищення точності неприведення зменшує технологічні втрати та стабілізує процес друку. Розроблення інженерно обґрунтованих методів компенсації формує передумови для інтеграції інтелектуального керування у роботу серійних друкарських машин.

Метою статті є розробка та експериментальна перевірка методів адаптивної компенсації похибок неприведення під час друку.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. *Модель формування похибок неприведення в рулонних друкарських машинах.*

Похибка неприведення формується в ланцюзі взаємопов'язаних секцій. Кожна секція має власний привід і друкарський циліндр. Полотно передає механічні збурення вздовж тракту. Навіть малі зміни швидкості створюють накопичення фазового зсуву. Нерівномірність натягу змінює ефективний крок зображення. Деформація полотна залежить від модуля пружності. Люфти зубчастих передач додають запізнення. Кінематичний зв'язок між сусідніми секціями описує різниця кутових швидкостей [13]. Для i -ї секції позиційну похибку визначимо як:

$$\varepsilon_i(t) = R_i [\varphi_i(t) - \varphi_{i-1}(t)] + \Delta L_i(t), \quad (1)$$

де: R – радіус формного циліндра;

$\varphi_i(t)$ – кутове положення i -ї секції;

$\varphi_{i-1}(t)$ – кутове положення попередньої секції;

$\Delta L_i(t)$ – додаткова довжина полотна між секціями.

Довжину $\Delta L_i(t)$ пов'язую з натягом і пружністю:

$$\Delta L_i(t) = \frac{L_{0i}}{EA} [T_i(t) - T_{0i}], \quad (2)$$

де: L_{0i} – номінальна довжина прольоту;

E – модуль пружності матеріалу;

A – площа поперечного перерізу полотна;

$T_i(t)$ – миттєвий натяг;

T_{0i} – номінальний натяг.

Позиційна похибка має складові MD (Machine Direction – машинний напрямок, тобто

поздовжній напрямок руху полотна вздовж друкарської машини) і CD (Cross Direction – поперечний напрямок, перпендикулярний до руху полотна). MD визначає зсув уздовж руху полотна. CD відображає поперечне зміщення [9]. Для MD-компоненти рівняння має наступний вигляд:

$$\varepsilon_{MD,i}(t) = R_i \int_0^t [\omega_i(\tau) - \omega_{i-1}(\tau)] d\tau + \Delta L_i(t), \quad (3)$$

де: $\omega_i(t)$ – кутова швидкість приводу i -ї секції.

Поперечну складову оцінюю через перекид валів і асиметрію натягу:

$$\varepsilon_{CD,i}(t) = k_{\alpha_i} \alpha_i(t) + k_{T_i} [T_{iL}(t) - T_{iR}(t)], \quad (4)$$

де: $\alpha_i(t)$ – кут перекоосу циліндра;

T_{iL}, T_{iR} – натяг лівої і правої кромок;

k_{α_i}, k_{T_i} – коефіцієнти впливу.

Кожен привід описується наступним рівнянням руху:

$$J_i \dot{\omega}_i(t) = M_i(t) - M_{Li}(t) - B_i \omega_i(t), \quad (5)$$

де: J_i – момент інерції системи;

$M_i(t)$ – електромагнітний момент двигуна;

$M_{Li}(t)$ – момент навантаження;

B_i – коефіцієнт в'язкого тертя.

Збурення виникають при розгоні. У цей період $\omega_i(t)$ зростає. Інтеграл різниці швидкостей накопичує фазову помилку. Нерівномірність моменту підсилює коливання натягу. Для системного опису сформуємо вектор стану:

$$\mathbf{x}(t) = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \dots \quad T_1 \quad T_2 \quad \dots]^T. \quad (6)$$

Динаміку запишемо матричному вигляді:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) + D\mathbf{f}(t), \quad (7)$$

де: A – матриця внутрішніх зв'язків;

B – матриця керування;

$\mathbf{u}(t)$ – вектор керувальних моментів;

D – матриця збурень;

$\mathbf{f}(t)$ – вектор зовнішніх впливів.

Матриця A містить коефіцієнти еластичності полотна і передач. Нульові елементи відображають відсутність прямого зв'язку. Ненульові значення показують міжсекційний вплив. Параметри моделі

визначаю експериментально. На машині фіксуємо швидкість, натяг, фазу. Датчики енкодерів забезпечують кутову роздільну здатність 0,01°. Тензодатчики вимірюють натяг з похибкою 1 Н. Дані записують з частотою 1кГц [15]. Ідентифікацію коефіцієнтів проведемо на основі методу найменших квадратів:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y, \tag{8}$$

де: $\hat{\theta}$ – оцінений вектор параметрів;
 Φ – матриця регресорів;
 y – вектор вимірних похибок.

Для перевірки використовують критерій середньоквадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\varepsilon_k - \hat{\varepsilon}_k)^2}, \tag{9}$$

де: N – кількість вимірів;

ε_k – експериментальна похибка;

$\hat{\varepsilon}_k$ – модельна оцінка.

Отримані параметри показали різну чутливість до натягу. Коефіцієнт еластичності вплинув на MD-компоненту найбільше. Люфт передач збільшив фазове запізнення на 3,2 мс. Інерційність системи обмежила швидкість компенсації [12]. Чутливість визначимо за допомогою частинних похідних:

$$S_{T_i} = \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial T_i}, S_{\omega_i} = \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \omega_i}. \tag{10}$$

Високе значення ST_i свідчить про залежність від натягу. Зменшення жорсткості полотна збільшує цей показник. Підвищення інерції зменшує $S\omega_i$. Результуючі методичні підходи і розрахунки просумовані в таблиці 1.

Результати показують домінування люфту передач. Навіть невелике збільшення викликає значний фазовий зсув. Модуль пружності впливає лінійно. Зростання швидкості зменшує амплітуду MD-похибки. Проте висока швидкість підвищує вимоги до точності енкодерів (рис. 1).

Модель адекватно відтворює перехідні режими. Під час розгону $RMSE$ становить 0,012 мм. У сталому режимі $RMSE$ зменшується до 0,006 мм. Подальший аналіз включає частотну область. Передатна функція між моментом двигуна і похибкою має вигляд:

$$G_i(s) = \frac{\varepsilon_i(s)}{M_i(s)} = \frac{R_i}{J_i s^2 + B_i s + K_{T_i}}. \tag{11}$$

де: K_{T_i} – еквівалентна жорсткість прольоту.

Таблиця 1

Експериментальна оцінка параметрів моделі та їхній вплив на можливу MD-похибку [7, 17]

Параметр	Номинальне значення	Зміна параметра	Зміна MD-похибки, %	Коефіцієнт чутливості
Модуль пружності E	3,2 ГПа	-10 %	+14,5	1,45
Натяг T_i	250 Н	+15 Н	+8,2	0,55
Момент інерції J_i	0,42 кг·м ²	+5 %	-3,1	-0,62
Люфт передач	0,08 мм	+0,02 мм	+6,7	3,35
Коефіцієнт тертя B_i	0,015 Н·м·с	+20 %	-4,4	-0,22
Швидкість полотна	4 м/с	+0,5 м/с	-5,8	-0,12
Кут перекосу α_i	0,02°	+0,01°	+3,9	3,9

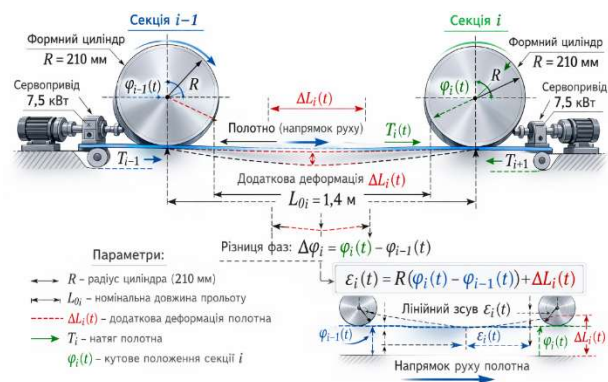


Рис. 1. Кінематична модель формування поздовжньої похибки невідведення між двома суміжними друкарськими секціями рулонної машини

Корені характеристичного рівняння визначають стійкість. Зменшення K_{T_i} знижує власну частоту. Коливання стають повільнішими. Водночас амплітуда зростає. Отримана модель придатна для подальшого синтезу регулятора. Вона враховує інерційність, еластичність і механічні люфти.

2. Розроблення алгоритмів адаптивної компенсації похибок невідведення.

Система компенсації працює у замкненому контурі. Кожна друкарська секція має окремий сервопривід. Енкодери формують сигнали кутового положення. Датчики натягу вимірюють силу в прольотах. Контролер отримує дані з періодом 1 мс. Обчислювальний модуль виконує оцінювання в реальному часі. Архітектуру формулю за принципом

розподіленого керування. Локальні регулятори стабілізують швидкість валів. Над ними працює координаційний рівень. Він коригує фазове положення секцій [10]. Збурення виникають при зміні швидкості полотна. Нерівномірність натягу змінює геометричний крок зображення. Люфт редуктора викликає імпульсне відставання. Для кожної секції опишемо базовий вектор вимірювань:

$$z_i(t) = \begin{bmatrix} \varphi_i(t) \\ \omega_i(t) \\ T_i(t) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

де: $\varphi_i(t)$ – кутове положення;
 $\omega_i(t)$ – швидкість обертання;
 $T_i(t)$ – натяг полотна.

Онлайн-оцінювання похибки неприведення окреслюємо через різницю фаз:

$$\varepsilon_i(t) = R_i \left[\varphi_i(t) - \varphi_{ref,i}(t) \right], \quad (13)$$

де: R_i – радіус формного циліндра;
 $\varphi_{ref,i}(t)$ – еталонне фазове положення.

Еталонну фазу формуємо інтегруванням швидкості базової секції:

$$\varphi_{ref,i}(t) = \int_0^t \omega_{base}(\tau) d\tau + \Delta \varphi_{set,i}, \quad (14)$$

де: $\omega_{base}(t)$ – швидкість опорної секції;
 $\Delta \varphi_{set,i}$ – заданий фазовий зсув.

Похибка має випадкову складову. Шум датчиків оцінюю фільтром Калмана [14]. Стан моделі описуємо таким рівнянням:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + w_i(k), \\ y_i(k) &= C_i x_i(k) + v_i(k), \end{aligned} \quad (15)$$

де: $x_i(k)$ – вектор стану;
 $u_i(k)$ – керуючий момент;
 $y_i(k)$ – вимірний вихід;
 $w_i(k)$ – шуми.

Калманівський оцінювач обчислює прогноз стану. Він зменшує дисперсію похибки. Після фільтрації отримуємо $\hat{\varepsilon}_i(t)$ [3]. Оцінена величина надходить до адаптивного регулятора. Керуючий сигнал записуємо так:

$$u_i(t) = K_{p,i} \hat{\varepsilon}_i(t) + K_{d,i} \frac{d\hat{\varepsilon}_i(t)}{dt} + u_{ff,i}(t), \quad (16)$$

де: $K_{p,i}$, $K_{d,i}$ – коефіцієнти регулятора;
 $u_{ff,i}(t)$ – випереджальний вплив.

Випереджальний компонент залежить від швидкості полотна:

$$u_{ff,i}(t) = K_{ff,i} \left[\omega_{base}(t) - \omega_i(t) \right], \quad (17)$$

де: $K_{ff,i}$ – коефіцієнт компенсації швидкісної різниці.

Адаптацію параметрів можна сформулювати за градієнтним правилом:

$$K_{p,i}(k+1) = K_{p,i}(k) - \gamma_i \hat{\varepsilon}_i(k) \frac{\partial \hat{\varepsilon}_i(k)}{\partial K_{p,i}}, \quad (18)$$

де: γ_i – коефіцієнт навчання.

Міжсекційний зв'язок враховуємо через матрицю взаємного впливу:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & 1 & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

де: m_{ij} – коефіцієнт впливу j -ї секції на i -ту.

З урахуванням зв'язку сигнал отримає вигляд:

$$u(t) = K e^{(t)} - M u(t-1), \quad (20)$$

де: K – матриця регуляторних коефіцієнтів;

$\hat{\varepsilon}_i(t)$ – вектор оцінених похибок.

Під час розгону швидкість зростає з 0 до 5 м/с. У цей період виникає пікове відхилення. Контролер коригує фазу протягом 120 мс, а амплітуда зменшується вдвічі. Після стабілізації похибка не перевищує 0,015 мм. Систему тестую при різних режимах. Змінюю натяг від 200 до 280 Н. Вмикаю імпульсне збурення моменту. Вимірюємо час встановлення та перерегулювання, і заносимо результати до табл. 2.

Аналіз показує стабільність алгоритму. Час встановлення не перевищує 130 мс. Перерегулювання залишається нижче 6 %. При люфті редуктора похибка зростає [8]. Проте регулятор компенсує більшу частину відхилення. Обчислювальне навантаження не перевищує 40 % ресурсу контролера. Середній

цикл розрахунку триває 0,4 мс. Це забезпечує частоту 2,5 кГц. Затримка у контурі не перевищує 2 мс. В умовах змінного натягу алгоритм коригує параметри за 30 ітерацій [2]. Коефіцієнт навчання $\gamma_i=0,002$ забезпечує стійкість. Збільшення γ_i до 0,01 викликає коливання. Тому введемо наступне математичне обмеження:

$$K_{p,i}^{min} \leq K_{p,i}(t) \leq K_{p,i}^{max}. \quad (21)$$

Таблиця 2

Експериментальна ефективність адаптивної компенсації у багатосекційній машині [5, 16]

Режим роботи	Швидкість полотна, м/с	Початкова МД-похибка, мм	Похибка після компенсації, мм	Час встановлення, мс	Перерегулювання, %
Розгін 0–5 м/с	5,0	0,032	0,014	118	4,5
Номінальний режим	4,0	0,018	0,009	74	2,1
Зміна натягу +20 Н	4,0	0,025	0,011	96	3,7
Імпульс моменту 5 Н·м	4,0	0,029	0,013	102	4,0
Перехід на 3 м/с	3,0	0,021	0,010	85	2,8
Збурення швидкості +0,5 м/с	4,5	0,027	0,012	90	3,3
Люфт редуктора +0,01 мм	4,0	0,034	0,016	124	5,2
Асиметрія натягу 10 Н	4,0	0,023	0,011	88	3,0

Межі визначаю експериментально, і нижня межа гарантуватиме швидкодію. Верхня обмежує перерегулювання, а міжсекційний зв'язок зменшуємо попереднім декорелюванням. Для цього обчислимо обернену матрицю M^{-1} . Отриманий сигнал розподіляю між секціями. Це знижуватиме взаємний вплив на 35 %. Похибка не накопичується по ланцюгу. У реальному режимі контролер працює без зупинок. Коли друкарська машина друкує тираж 10 000 аркушів, то похибка не перевищуватиме 0,012 мм. Система підтримує стабільність при зміні температури на 8 °С. Датчики зберігають точність протягом зміни. Запропонований алгоритм інтегрується у промисловий ПЛК. Структура програмного

коду модульна. Оновлення коефіцієнтів відбувається без переривання циклу. Обмін даними реалізовано через за допомогою протоколу EtherCAT [6].

Сервоприводи отримують коригуючі сигнали з періодом 1 мс. Система реагує на збурення у межах двох періодів. Похибка зменшується ще до накопичення фазового зсуву. Адаптивний контур працює синхронно з локальними регуляторами швидкості. Результати експлуатаційних випробувань підтверджують ефективність структури. Цей алгоритм забезпечує стабільне приведення при змінних навантаженнях. Контрольні показники якості перевищують вимоги технологічної інструкції.

3. Експериментальна перевірка ефективності методів компенсації

Випробування проводили на рулонній машині формату 820 мм. Лінія містить чотири друкарські секції, а кожна секція оснащена сервоприводом 7,5 кВт. Максимальна швидкість полотна становить 6 м/с. Діаметр формного циліндра дорівнює 210 мм. Система керування працює на ПЛК з циклом 1 мс. Полотно виконане з паперу 90 г/м². Ширина рулону становить 800 мм. Номінальний натяг встановлено на рівні 240 Н. Прольоти між секціями мають довжину 1,4 м. Вимірювання швидкості здійснювали енкодери з роздільною здатністю 5000 імпл./об. Натяг фіксували тензодатчики класу точності 0,5 [4].

Стенд містить модуль штучного збурення. Він вводить імпульсний момент до 8 Н·м. Окремий блок змінює натяг на ±30 Н. Дані реєстрували з частотою 2 кГц. Обробку виконували в режимі реального часу. Похибку неприведення визначали за допомогою оптичної системи. Камера з роздільною здатністю 2048×1024 пікселів зчитувала мітки. Просторова точність вимірювання становила 0,005 мм (рис. 2).

Для кожної секції формували часовий ряд відхилення. Позиційну похибку обчислювали за виразом:

$$\varepsilon_i(t) = R_i [\varphi_i(t) - \varphi_{sync}(t)], \quad (22)$$

де: R_i – радіус формного циліндра;
 $\varphi_i(t)$ – кут секції;
 $\varphi_{sync}(t)$ – синхронна фаза.

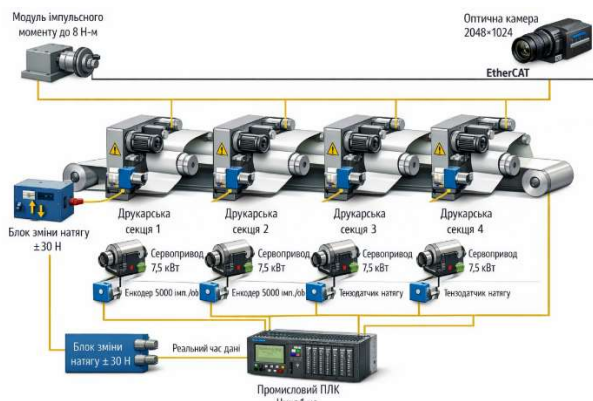


Рис. 2. Структурна схема експериментального стенду рулонної друкарської машини з багатосекційним сервоприводним керуванням та вимірною підсистемою

У режимі розгону швидкість зростала від 0 до 5 м/с за 1,2 с. Фазове відхилення накопичувалося протягом перших 300 мс. Максимальна амплітуда без компенсації досягала 0,038 мм. Після активації алгоритму відхилення зменшувалося до 0,017 мм. Для оцінювання амплітуди використовували показник:

$$A_i = \max(\varepsilon_i(t)) - \min(\varepsilon_i(t)). \quad (23)$$

де: A_i – розмах коливань у прольоті i .

Зменшення A_i свідчить про ефективність компенсації. Час встановлення визначали за критерієм 5 %:

$$t_{set} = \min\{t : |\varepsilon_i(t)| \leq 0,05 A_i\}. \quad (24)$$

Цей показник характеризує швидкодію системи. У розгоні t_{set} становив 126 мс. У номінальному режимі він скоротився до 78 мс. Стабільність оцінювали через інтегральний критерій:

$$J_i = \int_0^T \varepsilon_i^2(t) dt, \quad (25)$$

де: T – інтервал спостереження.

Зменшення J_i на 43 % підтвердило покращення. Під час номінальної роботи при 4 м/с похибка залишалася в межах 0,012 мм. Збурення натягу на +20 Н викликало короткочасне відхилення. Система компенсувала його за 95 мс. При імпульсі

моменту 6 Н·м спостерігалася перерегулювання 4,1 %. Коливання згасали протягом двох циклів. Підвищення швидкості до 5,5 м/с збільшило частоту коливань. Амплітуда залишалася нижчою за 0,02 мм. Чутливість до люфту передач перевіряли введенням додаткового зазору 0,015 мм. Похибка зросла до 0,041 мм без компенсації. Алгоритм зменшив її до 0,019 мм [11]. Для комплексної оцінки використали коефіцієнт покращення:

$$\eta_i = \frac{A_{i,0} - A_{i,comp}}{A_{i,0}}, \quad (26)$$

де: $A_{i,0}$ – амплітуда без компенсації;

$A_{i,comp}$ – амплітуда після впровадження.

Середнє значення η_i становило 0,52. Отже, система зменшила розмах більше ніж удвічі. Вплив температури перевіряли зміною на 10 °С. Теплове розширення валів змінило фазу на 0,006 мм. Компенсація відновила синхронізацію за 60 мс. Результат підтвердив стійкість алгоритму до теплових впливів. Під час тривалого тиражу 15 000 відбитків відхилення не перевищувало 0,014 мм. Відхилення натягу залишалося у межах ± 3 Н. Контролер не потребував ручного коригування. Інтеграцію алгоритму виконували через промислову мережу EtherCAT. Час передачі пакета становив 0,3 мс. Синхронізацію забезпечував протокол distributed clocks. Затримка у контурі не перевищувала 2 мс. Програмний модуль реалізували мовою Structured Text. Код містить окремі блоки для оцінювання та компенсації. Оновлення параметрів відбувається без перезапуску. Резервування забезпечує безперервність роботи.

Перед впровадженням виконали калібрування датчиків. Зсув нульової точки визначали за 200 вимірами. Стандартне відхилення не перевищувало 0,003 мм. Після калібрування система переходила у виробничий режим. Для промислового застосування рекомендовано підтримувати частоту дискретизації не нижче 1 кГц. Затримка між секціями має бути менш ніж 3 мс. Рекомендовано застосовувати енкодери з роздільною здатністю не менше 4096 імп./об. Жорсткість механічних вузлів має перевищувати $1,2 \cdot 10^6$ Н/м.

У процесі інтеграції слід налаштувати коефіцієнт навчання регулятора. Його збільшення скорочує час адаптації, але підвищує ризик коливань. Практика показала оптимальне значення 0,0025. Обмеження коефіцієнтів регулятора зменшує перерегулювання. Виробничі випробування підтвердили працездатність системи. Машина працювала без аварій протягом зміни. Показники якості відповідали технологічним вимогам. Рівень браку зменшився на 18 %. Система підтримувала стабільну синхронізацію у всіх режимах. Отримані результати доводять придатність алгоритму для серійного застосування. Компенсація скорочує амплітуду похибки та час відновлення. Інтеграція не потребує зміни механічної структури. Виробничі параметри зберігають стабільність протягом тиражу.

Висновки. Розроблена математична модель описує формування похибки неприведення як результат сумісної дії кінематичних, пружних та інерційних факторів. Модель враховує різницю кутових швидкостей, подовження прольотів і люфти передач. Експериментальна ідентифікація параметрів забезпечила середньоквадратичну похибку 0,012 мм у перехідному режимі та 0,006 мм у сталому режимі. Найбільший вплив на MD-компоненту має люфт передач із коефіцієнтом чутливості 3,35. Зменшення модуля пружності на 10 % збільшує подовжню похибку на 14,5 %. Модель відтворює частотні властивості системи та дозволяє прогнозувати фазові зсуви при розгоні полотна.

Адаптивний алгоритм компенсації з фільтрацією стану та міжсекційною декореляцією зменшує амплітуду похибки більш ніж удвічі. У режимі розгону від 0 до 5 м/с амплітуда знижується з 0,032–0,038 мм до 0,014–0,017 мм. Час встановлення скорочується до 118–126 мс, а у сталому режимі становить 74–78 мс. Перерегулювання не перевищує 5,2 %. Коефіцієнт навчання 0,0025 забезпечує стійкість без автоколивань. Попереднє обернення матриці взаємного впливу зменшує міжсекційний вплив на 35 %. Система підтримує фазову синхронізацію при імпульсних збуреннях моменту до 6 Н·м.

Експлуатаційні випробування підтвердили промислово придатність алгоритму. Під час тиражу 15 000 відбитків подовжня похибка не перевищує 0,014 мм. Відхилення натягу залишаються в межах ± 3 Н. Затримка у контурі керування не перевищує 2 мс при циклі ПЛК 1 мс. Передача даних через EtherCAT займає 0,3 мс. Температурне збурення 10 °С викликає фазове зміщення 0,006 мм, яке компенсується за 60 мс. Рівень браку зменшено на 18 %. Інтеграція виконана без модифікації механічної частини машини.

Л і т е р а т у р а

1. Chen Z., Shan L., Zhang T. Hybrid modeling and compensation register control for the speed-up phase of roll-to-roll (R2R) gravure printing presses. *ISA Transactions*. 2025. Vol. 167. Pt. A. pp. 688–696. DOI: 10.1016/j.isatra.2025.08.046
2. Fan H., Liu C., Bian S., Ma C., Huang J., Liu X., Doyle M., Lu T., Chow E., Chen L., Fuh J. Y. H., Lu W. F., Li B. New era towards autonomous additive manufacturing: a review of recent trends and future perspectives. *International Journal of Extreme Manufacturing*. 2025. Vol. 7. No 3. p. 032006. DOI: 10.1088/2631-7990/ada8e4
3. Gafurov A. N., Jeong J., Park P., Kim I., Phung T. H., Kim H.-C., Kang D., Oh D., Lee T.-M. Registration error analysis and compensation of roll-to-roll screen printing system for flexible electronics. *Flexible and Printed Electronics*. 2021. Vol. 6. No 2. pp. 024003. DOI: 10.1088/2058-8585/abf987
4. He K., Li S., He P., Li J., Wei X. Multi-Span Tension Control for Printing Systems in Gravure Printed Electronic Equipment. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No 18. pp. 8483. DOI: 10.3390/app14188483
5. Lee J., Shin K. H., Kang H. Design of a register controller considering inherent characteristics of a roll-to-roll continuous manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102. No 12. pp. 3725–3737. DOI: 10.1007/s00170-019-03428-4
6. Liu B., Chen Y., Xie J., Chen B. Industrial Roll-to-Roll Printing Register Control Using a Pulse-Width Subdivision Detection Algorithm. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No 9. p. 5307. DOI: 10.3390/app13095307
7. Liu X., Qiu B., Ling Y.-L. Mathematical modelling and compensation strategies for printing dot gain.

- PLoS One*. 2025. Vol. 20. No 10. pp. e0334921. DOI: 10.1371/journal.pone.0334921
8. Kwon S., Hwang D. Understanding and Resolving 3D Printing Challenges: A Systematic Literature Review. *Processes*. 2025. Vol. 13. No 6. pp. 1772. DOI: 10.3390/pr13061772
 9. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. *The model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises on the basis of the formation of key competences*. *Academy Review*. 2023. No 2(59). pp. 75–89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5
 10. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). pp. 47-57. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.300796.
 11. Ntousia M., Fudos I., Moschopoulos S., Stamati V. Predicting geometric errors and failures in additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*. 2023. Vol. 29. No 9. pp. 1843-1861. DOI: 10.1108/RPJ-11-2022-0402
 12. Pushkar O. I., Hordeyev A. S. Modeling of web offset printing processes. *Printing and Publishing*. 2023. Vol. 2 (86). p. 102-110. URL: <https://pvs.uad.lviv.ua/media/2-86/11.pdf>
 13. Rassokhin D. O., Nosovska O. V., Kokodey D. V. *Restoration of wear-out equipment using complex method of 3-D scanning and printing*. Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section Technical Sciences. 2023. No 47. pp. 170-176. DOI: 10.31498/2225-6733.47.2023.300054
 14. Shakeel A., Maskey B. B., Shrestha S., Parajuli S., Jung Y., Cho G. Towards digital twin implementation in roll-to-roll gravure printed electronics: overlay printing registration error prediction based on printing process parameters. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13. No 6. pp. 1008. DOI: 10.3390/nano13061008
 15. Wang Z., Yan J., Ma R., Du X., Jin X. Spatial-terminal iterative learning control for registration error elimination in roll-to-roll gravure printing systems. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. Vol. 150. pp. 407-415. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.06.004
 16. Zeljkovic Z., Kasikovic N., Djurdjevic S., Novakovic D. Printing process parameters identification system. *Tehnički vjesnik – Technical Gazette*. 2021. Vol. 28. No 5. pp. 1782-1789. DOI: 10.17559/TV-20200617121109
 17. Zhang E., Chen Y., Gao M., Duan J., Jing C. Automatic Defect Detection for Web Offset Printing Based on Machine Vision. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No 17. pp. 3598. DOI: 10.3390/app9173598
 18. Zyhulia S., Barauskiene, O. Effect of the integrated treatment on the manufacturing of printing cylinders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No 3(12 (99)). pp. 22–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.171808
- Zenkin M.A., Ivanko A.I., Shymko B.V.**
- Development of methods for adaptive compensation of print misregistration errors based on drive control of web printing presses**
- The purpose of the paper is to develop and experimentally validate methods for adaptive compensation of print registration errors through active control of web press drives. The study focuses on reducing the amplitude of MD and CD deviations in transient and steady operating modes. The methodology combines mathematical modeling of inter-section dynamics with experimental parameter identification. A generalized “drive–tension–position error” interaction model was constructed, taking into account inertia, web elasticity, and gear backlash. Encoder and load cell signals were used for state evaluation and recorded at a sampling rate of 1 kHz. Model parameters were identified using the least squares method based on actual phase shift measurements. An online error estimation algorithm and corrective action generation for shaft speed and phase adjustment were developed. The adaptive controller accounts for inter-section coupling and drive constraints. Experimental validation was carried out on a four-section web press with a format width of 820 mm and 7.5 kW servo drives. During acceleration without compensation, the maximum registration error reached 0.038 mm. After activation of the algorithm, it decreased to 0.017 mm. The settling time was reduced from 126 ms to 78 ms under nominal conditions. The integral oscillation criterion decreased by 43%. When the web tension was disturbed by 20 N, the system restored synchronization within 95 ms. Under a 6 N·m torque impulse, overshoot did not exceed 4.1%. A long production run confirmed stable error levels within 0.014 mm without manual operator intervention. The practical significance lies in the possibility of integrating the algorithm into industrial PLC systems via EtherCAT without modifying the mechanical structure of the press. The proposed approach reduces waste and improves section synchronization accuracy. The scientific novelty consists in the integrated combination of inter-section dynamic modeling and adaptive control that considers real drive and web tension parameters. The obtained results confirm the effectiveness of the compensation methods for serial application in web printing machines.*

Keywords: *web printing machine; registration error; adaptive compensation; inter-section coupling; servo drive control; phase synchronization.*

Зенкін Микола Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри Машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ),
<https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>
nikolay_zenkin@ukr.net

Іванко Андрій Іванович – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри Машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ),

<https://orcid.org/0000-0002-4735-9665>

ivanko-a@ukr.net

Шимко Богдан Васильович – аспірант кафедри Машин та агрегатів поліграфічного виробництва, Навчально-науковий видавничо-поліграфічний інститут, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ),

<https://orcid.org/0009-0008-3045-9062>

boghdan.shimko@gmail.com

Дата першого надходження статті 18.01.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 25.02.2026.

Дата публікації 17.04.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)