

Микола Анатолійович Зенкін¹, Олександр Ігорович Шведченко²

¹доктор технічних наук, професор,

професор кафедри машин і агрегатів поліграфічного виробництва

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: nikolay_zenkin@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>. ResearcherID: AHB-4549-2022

²аспірант кафедри машин і агрегатів поліграфічного виробництва

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: shvedchenko.sasha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3649-1276>

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕХАНІЧНИХ ПРИВОДІВ РУЛОННИХ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН НА ТОЧНІСТЬ СУМІЩЕННЯ ФАРБ

У статті проведено детальне дослідження конструктивних особливостей механічних приводів рулонних друкарських машин та їхнього впливу на точність суміщення фарб у багатобарвному друці, що є визначальним фактором для забезпечення високої якості друкарської продукції. Обґрунтовано необхідність створення теоретичної моделі руху стрічкопровідних елементів, яка враховує динамічні характеристики, геометричні особливості конструкцій приводів і їхній вплив на точність процесу фарбоперенесення. У роботі було розроблено систему диференціальних рівнянь, що дозволяє не лише прогнозувати поведінку друкарських систем під різними умовами, але й оптимізувати їхню роботу відповідно до сучасних вимог поліграфічної галузі. Запропоновано впровадження гібридних систем приводів, які поєднують механічні та електронні компоненти, що сприяє значному зменшенню рівня вібрацій і підвищенню точності суміщення фарб.

Ключові слова: рулонні друкарські машини; механічні приводи; точність суміщення фарб; вібрації та коливання; фарбоперенесення; оптимізація конструкцій.

Рис.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Сучасні рулонні друкарські машини посідають центральне місце в поліграфічній галузі, адже вони здатні забезпечувати як високі швидкості друку, так і відповідну якість, що є необхідною умовою для виготовлення широкого спектра друкованої продукції. Водночас одним із ключових факторів, що впливають на кінцеву якість друку, є точність суміщення фарб, яка визначає відповідність готової продукції встановленим стандартам. Особливості конструкції механічних приводів друкарських машин мають безпосередній вплив на забезпечення високої точності та стабільності їхньої роботи. Ігнорування цього аспекту може призвести до значних витрат, пов'язаних із виробництвом бракованої продукції, простоем обладнання або навіть погіршенням репутації виробника. У контексті постійного підвищення вимог до якості друку дослідження, спрямовані на аналіз і вдосконалення конструктивних особливостей механічних приводів для досягнення точного суміщення фарб, є надзвичайно важливими.

Постановка проблеми. Однією з найважливіших задач, яка стоїть перед поліграфічними підприємствами, є досягнення стабільної та високої точності суміщення фарб у процесі друку, особливо за умов роботи на високих швидкостях. Попри те, що поліграфічна галузь демонструє значний прогрес у розвитку технологій, численні аспекти, пов'язані з конструкцією механічних приводів рулонних друкарських машин, залишаються досить малодослідженими. Відсутність системного підходу до аналізу впливу конструктивних характеристик приводів на точність друку ускладнює вирішення проблеми суміщення фарб і знижує ефективність процесу друку. Таким чином, основною проблемою є необхідність створення науково обґрунтованих рішень для вдосконалення конструкції механічних приводів, що дозволить забезпечити стабільність роботи друкарського обладнання та високу якість кінцевої продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, спрямовані на аналіз конструктивних особливостей механічних приводів друкарських машин та їхнього впливу на точність суміщення фарб, посідають одне з провідних місць у сучасній поліграфічній інженерії та активно розвиваються у численних наукових роботах.

Значущість цього напрямку особливо підкреслюють дослідження, присвячені вивченню динамічних властивостей механічних приводів друкарських машин. Наприклад, у роботах [1], [2] наголошується на ключовій ролі друкарських циліндрів як основного джерела вібрацій, які викликають дефекти друку, найбільш поширеним серед яких є нерівномірність оптичної щільності. Автори зазначають, що небажані вібрації виникають унаслідок прямого контакту між основними циліндрами друкарського блоку, що, своєю чергою, створює додаткові динамічні навантаження на приводи, негативно впливаючи на точність друку.

Інші дослідники, наприклад, у роботах [3], [4], акцентують увагу на вимірюваннях коливань друкарських циліндрів у реальних умовах експлуатації друкарських машин. Такі дослідження підтверджують значний вплив вібрацій на якість друку, а також пропонують різноманітні підходи для зменшення їхнього негативного впливу, зокрема шляхом вдосконалення конструкції механічних приводів і використання сучасних матеріалів із високими демпфуючими характеристиками, які здатні ефективно знижувати рівень коливань.

Динамічна поведінка друкарських блоків досліджується у роботах [5] та [6], де використовуються методи кінцевих елементів для моделювання поведінки друкарських циліндрів під впливом різних навантажень. У цих роботах детально аналізується проблема великої деформації контактних зон між циліндрами, яка є одним із головних чинників, що знижують якість фарбоперенесення. Завдяки математичному моделюванню була розроблена система рівнянь, яка враховує параметричні характеристики друкарського блоку, що дозволяє прогнозувати поведінку машини з високою точністю. У дослідженні [7] акцентується увага на геометричних відхиленнях друкарських циліндрів і їхньому впливі на точність суміщення фарб. Автори підкреслюють, що деформації циліндрів значно впливають на оптичні та механічні характеристики друкарського контакту, а тому врахування геометричних параметрів при розробці механічних приводів є критично важливим для мінімізації дефектів друку.

Окремі дослідники, такі як автори роботи [8], пропонують використання рівнянь Нав'є-Стокса у полярній системі координат для моделювання поведінки приводних елементів друкарських машин і сам підхід дозволяє врахувати вплив змінних характеристик друкарських апаратів і детально проаналізувати їхній вплив на точність суміщення фарб, що відкриває нові можливості для вдосконалення приводних систем. Крім того, наукові праці, такі як [9], наголошують на важливості оптимізації конструкції приводів з метою забезпечення стабільної роботи друкарських машин у широкому діапазоні швидкостей. Зокрема, пропонується впровадження гібридних приводних систем, які поєднують у собі механічні та електронні компоненти, що дозволяє мінімізувати вплив вібрацій і забезпечити високу якість друку.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Хоча є значні досягнення в дослідженні цієї проблеми, необхідність створення більш досконалих моделей для аналізу впливу конструктивних і динамічних характеристик приводів залишається актуальним завданням для сучасної поліграфічної інженерії.

Метою статті є дослідження впливу конструктивних характеристик механічних приводів рулонних друкарських машин на точність суміщення фарб, що дозволить виявити ключові аспекти, які впливають на стабільність і точність їхньої роботи.

Виклад основного матеріалу. Рулонні друкарські машини являють собою складні інженерні конструкції, які забезпечують процес нанесення зображень на рулонні матеріали, серед яких найчастіше використовуються папір, картон або полімерні плівки, завдяки багаторівневому друкарському циклу. Основними елементами таких машин є системи подачі рулонів, друкарські циліндри, механізми фарбоперенесення, сушильні

блоки, а також приводи, які координують злагоджену та синхронізовану роботу всіх складових. Точність суміщення фарб є одним із базових критеріїв якості друкарської продукції, що відображає рівень відповідності кольорових шарів їхнім проєктним положенням на формі. Вказаний параметр відіграє надзвичайно важливу роль у багатокольоровому друці, де кожен шар фарби наноситься окремо, але водночас повинен створювати гармонійне, чітке та яскраве зображення. Недостатня точність у суміщенні фарб може призводити до помітних дефектів, таких як «розходження кольорів», що негативно впливають на естетичний вигляд продукції й можуть суттєво знижувати її комерційну привабливість [10]. На точність суміщення фарб впливає комплекс технічних, конструктивних і експлуатаційних чинників. Особливу увагу необхідно приділяти стабільності роботи механічних приводів, синхронізації обертання друкарських циліндрів, жорсткості конструкції машини, а також рівню автоматизації процесу контролю друку. Точність друку формується під впливом низки факторів:

1. Конструктивні характеристики механічних приводів. Геометрична точність та якість виготовлення механічних вузлів, таких як шестерні, муфти або циліндри, визначають стабільність і плавність роботи системи, а будь-які люфти або неточності в цих елементах можуть спричинити асинхронність, що знижує точність друку.

2. Динамічні навантаження та вібрації. У процесі роботи друкарських машин на високих швидкостях можуть виникати вібрації, які впливають на точність суміщення шарів фарби. Для зниження таких впливів важливо забезпечити належну жорсткість конструкції та використовувати матеріали з демпфуючими властивостями.

3. Температурні та механічні деформації. Зміни температурного режиму під час друку можуть викликати термічне розширення або стискання окремих компонентів машини, що призводить до відхилень у точності, тому при проєктуванні передбачається застосування систем термостабілізації.

4. Технологічні параметри друку. Параметри, такі як швидкість роботи, властивості матеріалу, що використовується, а також в'язкість фарб, також впливають на точність суміщення кольорів; оптимізація цих параметрів дозволяє забезпечити стабільність друкарського процесу.

5. Системи автоматичного контролю. Застосування сучасних систем автоматичного моніторингу та корекції друку, які використовують оптичні сенсори та програмне забезпечення, значно покращує якість друку та зменшує залежність результатів від людського фактору [3; 8].

У рулонних друкарських машинах секційної побудови, які застосовуються для виконання багатобарвного друку, передача руху між друкарськими секціями зазвичай здійснюється через горизонтальний вал, як показано на рис. 1. Така конструкція хоча і була поширеною раніше, на сьогодні вважається застарілою через наявність негативних динамічних явищ, що суттєво впливають на точність роботи друкарських систем. Основним викликом у розробці високопродуктивних багатобарвних рулонних друкарських машин секційного типу є створення механічних приводів, які здатні забезпечити мінімальний рівень вібрацій у виконавчих механізмах під час роботи, що своєю чергою дозволяє досягти максимальної точності суміщення фарб при виконанні кольорового друку.

Механічні приводи таких машин складаються з високоточних систем передач, які забезпечують рух елементів друкарського обладнання. Одним із найактуальніших завдань у цьому напрямку є розробка приводів, що знижують низькочастотні коливання, оскільки такі коливання негативно впливають на стабільність роботи друкарської машини та можуть призводити до появи дефектів на друкованій продукції. Зокрема, вибір оптимальної системи приводу є ключовим етапом у проєктуванні сучасних рулонних друкарських машин, які повинні відповідати сучасним вимогам якості та продуктивності (рис. 1).

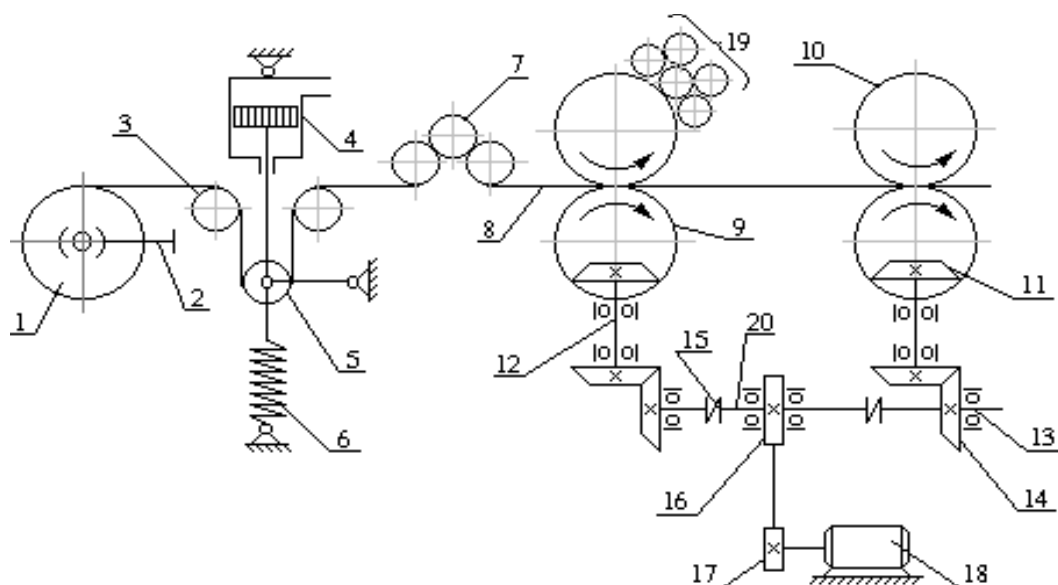


Рис. 1. Схема двофарбової рулонної машини секційної побудови:

- 1 – рулон; 2 – система гальмування рулону; 3 – стрічкопровідний вал; 4 – пневмоциліндр;
 5 – вал коливаний; 6 – пружина розтягування; 7 – система стабілізаційних валів;
 8 – паперова стрічка; 9 – перший вал; 10 – другий вал; 11 – кінцева шестерня;
 12 – вертикальний вал; 13 – опора горизонтального столу; 14 – кінцева пара;
 15 – пружна муфта; 16 – відомий шків; 17 – ведучий шків; 18 – електричний двигун;
 19 – апарат суміщення фарб; 20 – горизонтальний синхронізувальний вал
 Джерело: [11].

Особливістю приводної системи рулонних друкарських машин є необхідність забезпечення стійких динамічних характеристик у всіх робочих режимах, починаючи з моменту пуску машини та до її зупинки. Це означає, що система повинна бути здатною стабільно функціонувати як у режимах низької швидкості, так і при максимальних обертах, забезпечуючи при цьому точність руху всіх елементів машини. Саме тому створення приводів, що мінімізують вібрації та забезпечують високу стабільність у роботі, є пріоритетним завданням для розробників рулонних друкарських машин, орієнтованих на забезпечення високої точності суміщення фарб у процесі друку.

Технологічний процес друкування в рулонних друкарських машинах побудований на послідовному нанесенні шарів фарби, де кожен друкований апарат виконує свою функцію. У першому друкованому апараті стрічка покривається зображенням, нанесеним однією фарбою, а після певного інтервалу часу у другому апараті додається наступний шар фарби іншого кольору. Однак точність суміщення цих шарів залежить від багатьох факторів, серед яких домінують динамічні характеристики механічних приводів друкарської машини [12]. Для визначення ступеня розбіжності фарб на багатобарвних відбитках, які виникають внаслідок впливу вібрацій і коливань, необхідно створити розрахункову модель, яка враховує всі основні фактори впливу і властивості приводу. Зазначена модель повинна бути описана системою рівнянь руху стрічкопровідних елементів, що дозволить отримати точні розрахунки за допомогою сучасних методів розв'язання.

За даними [13] головним джерелом вібрацій у друкарських машинах є друкарські циліндри, що входять до складу офсетного друкарського апарату. Цей блок складається із трьох основних циліндрів, два з яких перебувають у безпосередньому контакті, що створює небажані вібрації. Такі вібрації є основною причиною дефектів, зокрема нерівномірності оптичної щільності відбитка, що значно впливає на якість друку. Результати вимірювання коливань циліндрів у реальних умовах роботи друкарської машини представлені у багатьох дослідженнях, де підкреслюється важливість врахування впливу деформацій

друкарських вузлів. Наприклад, використовуючи метод кінцевих елементів, проведено моделювання поведінки друкарського блоку, яке було описано системою диференціальних рівнянь із параметричними характеристиками. У процесі аналізу встановлено, що основним фактором впливу на роботу друкарського апарату є стисливість шару на циліндрі з резинотканинним полотном, що визначає стабільність фарбоперенесення.

Особливу увагу заслуговує геометрична інтерпретація моделі, яка дозволяє візуалізувати зміни у структурі барвистого шару й виявити закономірності цих змін. Встановлено, що деформація циліндрів не лише є наслідком відхилень від геометричної форми, але й значно впливає на якість друкарського контакту. Попри певні успіхи у вивченні процесів фарбоперенесення, на сьогодні залишається невирішеним завдання повного врахування впливу осьових вібрацій циліндрів та відхилень від їхніх геометричних характеристик на поведінку офсетної друкарської системи у зоні контакту. Для вирішення зазначеної задачі розглядається використання рівнянь Нав'є–Стокса у полярній системі координат, центр якої розташований у точці Q_1 , зі змінними (r, φ) , що відповідає центральній точці одного з друкарських циліндрів. Такий підхід дозволяє детально проаналізувати динаміку роботи друкарського апарату та врахувати вплив змінних характеристик, що впливають на точність суміщення фарб [14]. Як основу для розрахунків використано класичну схему офсетного друкарського апарату, що забезпечує універсальність і надійність отриманих результатів (рис. 2).

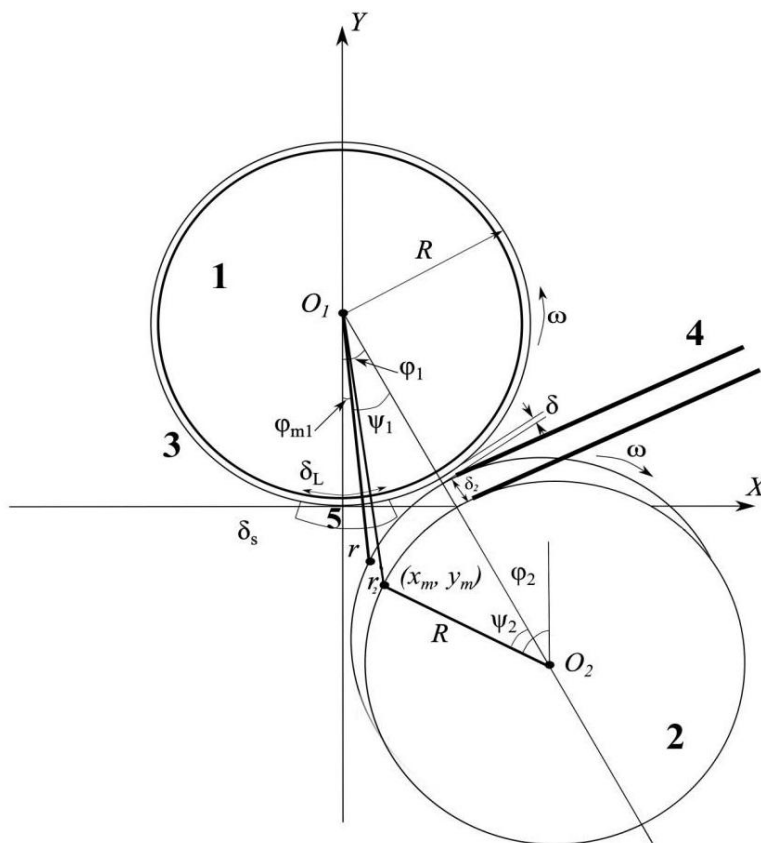


Рис. 2. Фрагмент вузла друкарського апарату рулонної друкарської машини, у якому здійснюється перенесення фарби на носій інформації:

(x_m, y_m) , (x_c, y_c) – координати даної точки та центру циліндра 1 в декартовій системі координат OXY ; φ_0 , φ_{m1} – початкове значення θ для центру циліндра 2 та поточне значення θ точки; φ_1 , φ_2 – кути від двох центрів циліндрів між точкою циліндра 2 та вертикальними напрямками залежно від часу та кутовий швидкості обертання; φ_{m0} – початкове значення φ_2 ; ψ_1 – кут від центру Q_1 між точкою кола циліндра 2 і відрізком, що з'єднує центри циліндрів Q_1 та Q_2 ; ψ_2 – кути відповідної дуги в другому циліндрі
Джерело: розроблено автором.

Алгоритм чисельного моделювання, взятий за основу, для автоматизації розрахунку показників фарбоперенесення (перенесення в'язкої нестисливої рідини) у зоні друкувального контакту має наступну послідовність:

- 1) введення вихідних даних;
- 2) виконання умови адгезії друкарської фарби стосовно сприймаючих поверхонь;
- 3) розрахунок радіальних сил F_r моментів сил M_φ для деформації поверхні.

Обов'язковою щодо дотичних напруг є умова проведення розрахунку з урахуванням дискретної сітки в околиці вузлів (N_i) поверхні циліндрів 1 і 2 та його швидкостей деформації. Сумарні величини по всіх граничних вузлах поверхні циліндра, що стикаються з фарбою, мають вигляд:

$$F_r = \sum_{i=1}^{N_i} F_{ri} \times e_{ri}, M_\varphi \sum_{i=1}^{N_i} M_{ri}. \quad (1)$$

де e_{ri} – одиничний орт для i -го напрямку радіуса вектора біля прикордонного (i, j)-го вузла розрахункової сітки;

- 4) визначення деформацій кордонів;

5) визначення коефіцієнтів фарбоперенесення після переходу в супутню систему координат із перетворенням $\theta = \varphi - \omega t$. У нових змінних (r, θ) з компонентами швидкості (U_r, U_θ) та за наявності кутового прискорення цієї системи ε рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_\theta R}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta R} - \frac{(U_\theta + \omega r)^2}{r} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + v \left(\nabla^2 U_r - \frac{U_r}{r^2} - \frac{2R}{r^2} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta R} \right), \\ \frac{\partial U_\theta}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{U_\theta R}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta R} + \frac{U_r U_\theta}{r} + 2U_r \omega + \varepsilon r &= -\frac{1}{\rho} \frac{R}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta R} + v \left(\nabla^2 U_\theta - \frac{U_\theta}{r^2} + \frac{2R}{r^2} \frac{\partial U_r}{\partial \theta R} \right), \\ \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{U_r}{r} + \frac{R}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta R} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{R^2}{r^2} \frac{\partial^2 U}{(\partial \theta R)^2}$ – оператор Лапласа,

v – кінематична в'язкість,

ρ – густина рідини,

P – тиск,

φ – кутова швидкість обертання.

Для представлення результатів моделювання аналізованої системи надалі використовуватиметься перехід до інших координат $(x, y) = (R_0 \theta, R_0 - r)$.

Припускаємо, що поверхні циліндрів 1 і 2 мають спотворення по радіусах у деяких сегментах кола та їхні радіуси можна подати у вигляді:

$$R_1(\theta) = R_0 + \alpha_1 \theta + \beta_1 \theta^2 + \gamma_1, \theta \in (\theta_1, \theta_2); \quad (3)$$

$$R_2(\theta) = R_0 + \alpha_2 \theta + \beta_2 \theta^2 + \gamma_2, \theta \in (\theta_1, \theta_2), \quad (4)$$

де θ_2 – кут звіту поверхні циліндра 2 з урахуванням того, що точка $\theta_2 = 0$ стикається з початком координат при наступному контакті [15].

За умови, що $t = 0$ координати (r, θ) для області друкарської фарби Ω в супутній системі обираються в межах:

$$\begin{aligned} r &\in [R, R + \delta_s], \\ \theta &\in \left[\frac{-\delta_L}{(2R)}, \frac{\delta_L}{(2R)} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

По всій області:

$$U_r(r, \theta) = 0; U_\theta(r, \theta) = 0. \quad (6)$$

Координати початкової точки зіткнення з циліндром:

$$2 - \left(\frac{R_1 + \delta_s, \delta_L}{2R_0} \right). \quad (7)$$

Для неї компоненти швидкості визначаються за формулами групи (8) з умов адгезії та вбирання фарби:

$$\begin{aligned} V_\theta &= V_x \cos(\varphi_{m1}) + V_y \sin(\varphi_{m1}) \\ V_r &= V_x \sin(\varphi_{m1}) - V_y \cos(\varphi_{m1}) \end{aligned} \quad (8)$$

для яких

$$\begin{aligned} x_m &= x_c + (2R_0 + R_2 + \delta) \sin(\varphi_1) - r \sin(\varphi_2), \\ y_m &= y_c - (2R_0 + R_2 + \delta) \cos(\varphi_1) + r \cos(\varphi_2), \\ V_x &= -\omega + (2R_0 + R_2 + \delta) \cos(\varphi_1) - 2\omega r \cos(\varphi_2), \\ V_y &= -\omega + (2R_0 + R_2 + \delta) \sin(\varphi_1) + 2\omega r \sin(\varphi_2), \\ \varphi_1 &= \varphi_0 - \omega t, \quad \varphi_2 = \varphi_{m0} - 2\omega t. \end{aligned} \quad (9)$$

Виходячи з того, що рух центру циліндра 2 навколо циліндра 1 здійснюється з кутовою швидкістю ω , а навколо свого центру – з 2ω в протилежному напрямку. У супутній системі координати точок кола радіуса R для циліндра 2, центр якого O_2 , знаходиться на відстані $(2R_0 + R_2 + \delta)$ від $O_1 - (r_2, \omega_1)$ і мають вигляд:

$$r_2 = \sqrt{R_2^2 \sin^2 \varphi_2 (2R_0 + \delta - R_2 \cos \varphi_2)^2}. \quad (10)$$

$$\psi_1 = \arcsin \left(\frac{\sin \psi_2}{\sqrt{1 + 4 \frac{R_0^2}{R_2^2} + \frac{\delta^2}{R_2^2} + 4 \frac{R_0 + \delta}{R_2^2} - 2 \left(2R_0 + \frac{\delta}{R_2} \right) \cos \psi_2}} \right). \quad (11)$$

У полярній системі координат (r, θ) визначаються координати для точок (x_m, y_m) , по кутах (φ_1, φ_2) для змінних положень з часом.

Далі $\psi_2 = \varphi_2 - \varphi_1$ згідно з формулами (10) та (11) визначається r і ψ_1 . Тоді $\theta = \varphi_{m1} = \varphi_1 - \psi_1$ за умови, що радіуси циліндрів 1 і 2 будуть рівні між собою.

Розглянемо вплив вібрацій осей циліндрів на прикладі вібрації вісі циліндра 2. Для цього розглядатимемо зміну відстані між центрами циліндрів за часом з $2R + \delta$ до $2R + \delta_2$, де δ_2 представимо у вигляді осцилювання за таким законом з амплітудою a і частотою ν :

$$\delta_2 \delta + a \times \sin(2\pi \nu t). \quad (12)$$

При зміні величини відстані між центрами циліндрів при підборі фарби необхідно враховувати величину r_2 замість величини r (див. рис. 2.), що призводить до зміни значень для ψ_1, m_1 , які перераховуються згідно з формулами (10), (11). При цьому зміна інших величин, як ψ_2 та φ_1 буде представлятися в колишньому вигляді за наведеними вище формулами.

Отже, досягнення високої точності суміщення фарб у рулонних друкарських машинах є багатогранним завданням, яке вимагає комплексного підходу до проектування, експлуатації та постійного вдосконалення конструктивних рішень, що забезпечує виробництво продукції, яка відповідає найвищим стандартам якості.

Висновки. За результатами дослідження ідентифіковано основні конструктивні особливості механічних приводів рулонних друкарських машин, які мають вирішальний вплив на забезпечення високої точності суміщення фарб у процесі багатобарвного друку. Серед таких особливостей ключовими є геометрична точність виготовлення механічних вузлів, оптимальна жорсткість конструкції приводу, а також здатність системи зводити до мінімуму вібрації, що виникають у виконавчих механізмах під час роботи.

У межах дослідження теоретична модель руху стрічкопровідних елементів друкарських машин, яка враховує вплив динамічних навантажень, геометричних деформацій і конструктивних характеристик механічного приводу. Модель, представлена у вигляді системи рівнянь, забезпечує можливість точного прогнозування поведінки друкарських систем і дозволяє оптимізувати процес фарбоперенесення з метою досягнення найкращих результатів у багатобарвному друці. Також було запропоновано впровадження гібридних систем приводів, які передбачають інтеграцію механічних і електронних компонентів для значного підвищення точності суміщення фарб. Крім цього, рекомендовано модернізацію існуючих систем приводів шляхом використання алгоритмів чисельного моделювання, що сприятиме автоматизації процесу фарбоперенесення і забезпечить стабільність роботи друкарських машин навіть у складних умовах експлуатації.

Список використаних джерел

1. Морфлюк В. Ф. (2014). Дослідження моделей динаміки друкарських апаратів / В. Ф. Морфлюк. *Вісник КПІ*, 1(43), 50-53.
2. Seshadri, Pagilla A. P., Lynch J. (2013). Modeling Print Registration in Roll-to-Roll Printing Presses. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, (135), 031016. <https://doi.org/10.1115/1.4023761>.
3. Young Min Lee [et al.]. (2016). The influence of distortion on enhancing the registration accuracy in roll-to-roll printing processes. *Macromolecular Research*, 24(12), 1062-1069. <https://doi.org/10.1007/s13233-016-4149-7>.
4. Makedon, V. [et al.]. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
5. Bălan, Emilia [et al.]. (2021). Preventive maintenance features specific to offset printing machines. *MATEC Web of Conferences*, 343, 08012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134308012>.
6. Казьмірович, Р. В., Казьмірович, О. Р. (2014). Удосконалення методу контролю точності суміщення та позиціонування фарбовідбитків на аркушевих друкарських машинах. *Наукові записки [Української академії друкарства]*, (3), 95-102.
7. Bangchao, Liu [et al.]. (2023). Industrial Roll-to-Roll Printing Register Control Using a Pulse-Width Subdivision Detection Algorithm. *Applied Sciences*, 13(9), 5307. <https://doi.org/10.3390/app13095307>.
8. Петрук, А. І., Черня, Б. О., Моргун, О. Я. (2008). Навантаження приводу великоформатних ниткозшивних машин та шляхи їх зменшення. *Технологія і техніка друкарства*, 2, 94-99.
9. Thanh, Huy Phung [et al.]. (2023). Machine learning approach to monitor inkjet jetting status based on the piezo self-sensing. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45445-0>.
10. Македон, В. В., Холод, О. Г., Ярмоленко, Л. І. (2023). Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*, (2(59)) 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
11. Marja, K. Välimäki [et al.]. (2022). Accuracy control for roll and sheet processed printed electronics on flexible plastic substrates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(9-10), 6255-6273. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08717-z>.

12. Киричок, П. О., Морфлюк, В. Ф., Олійник, В. Г. (2008). Температурна стабілізація процесів суміщення фарб у рулонних друкарських машинах. *Технологія і техніка друкарства*, (2(20)), 158-164. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(20\).2008.60519](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(20).2008.60519).
13. Sandeep, Suresh Babu [et al.]. (2022). Recent developments in the application of machine-learning towards accelerated predictive multiscale design and additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2141653>.
14. Македон, В. В., Байлова, О. О. (2023). Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки*, 47, 16-26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>.
15. Mohammad, Hossein Nikooharf [et al.]. (2024). Machine learning in polymer additive manufacturing: a review. *International Journal of Material Forming*, 17(6), <https://doi.org/10.1007/s12289-024-01854-8>.

References

1. Morflyuk, V. F. (2014). Doslidzhennya modeley dynamiky drukarskykh apparatov [Research of dynamic models of printing apparatuses]. *Visnyk KPI – Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute*, 1(43), 50–53.
2. Seshadri, Aravind, & Pagilla, Prabhakar & Lynch, Jamie. (2013). Modeling Print Registration in Roll-to-Roll Printing Presses. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 135, 031016. <https://doi.org/10.1115/1.4023761>.
3. Lee, Y., Kim, O., Choi, D., Yu, J.-W. (2016). The influence of distortion on enhancing the registration accuracy in roll-to-roll printing processes. *Macromolecular Research*, 24, 1062–1069. <https://doi.org/10.1007/s13233-016-4149-7>.
4. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunencko, N., Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
5. Bălan, E., Berculescu, L., Răcheru, R.-G., Pițigoi, D. V., & Adăscălița, L. (2021). Preventive maintenance features specific to offset printing machines. *MATEC Web of Conferences*, 343, 08012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134308012>.
6. Kazmirovych, R.V., Kazmirovych, O.R. (2012). Udoskonalennya metodu kontrolyu tochnosti sumishchennya ta pozytsionuvannya farbovidbytiv na arkushevykh drukars'kykh mashynakh [Improvement of the method for controlling the accuracy of alignment and positioning of printed images on sheet-fed printing machines]. *Naukovi zapysky Ukrayinskoyi akademiyi drukarstva – Scientific Notes of the Ukrainian Academy of Printing*, 2(58), 110–115.
7. Liu, B., Chen, Y., Xie, J., & Chen, B. (2023). Industrial Roll-to-Roll Printing Register Control Using a Pulse-Width Subdivision Detection Algorithm. *Applied Sciences*, 13(9), 5307. <https://doi.org/10.3390/app13095307>.
8. Petruk, A.I., Chernya, B.O., Morhun, O.Ya. (2008). Navantazhennya pryvodu velykoformatnykh nytkozshyvnykh mashyn ta shlyakhy yikh zmenshennya [Loads on the drive of large-format thread-sewing machines and ways to reduce them]. *Tekhnolohiya i tekhnika drukarstva – Technology and Techniques of Printing*, 2(20), 94–99.
9. Phung, T.H., Park, S.H., Kim, I., Lee, T.-M., & Kwon, K.-S. (2023). Machine learning approach to monitor inkjet jetting status based on the piezo self-sensing. *Scientific Reports*, 13, 18089. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45445-0>.
10. Makedon, V. V., Kholod, O. H., Yarmolenko, L. I. (2023). Model otsinky k10. onkurentospro-mozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpryyemstv na zasadakh formuvannya klyuchovykh kompetentsiy [The model of assessing the competitiveness of high-tech enterprises based on the formation of key competencies]. *Akademichnyy ohlyad – Academic review*, 2(59), 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
11. Välimäki, M.K., Jansson, E., Von Morgen, V.J.J., Ylikunnari, M., Väisänen, K.-L., Ontero, P., Kehusmaa, M., Korhonen, P., & Kraft, T. M. (2022). Accuracy control for roll and sheet processed printed electronics on flexible plastic substrates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(9-10), 6255–6273. DOI: 10.1007/s00170-022-08717-z.

12. Kyrychok, P.O., Morflyuk, V.F., Oliynyk, V.H. (2008). Temperaturna stabilizatsiya protsesiv sumishchennya farb u rulonnykh drukarskykh mashynakh [Temperature stabilization of color registration processes in roll-fed printing machines]. *Tekhnolohiya i tekhnika drukarstva – Technology and Techniques of Printing*, 2(20), 158–164. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(20\).2008.60519](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(20).2008.60519).

13. Babu, S.S., Mourad, A.H.I., Harib, K.H., & Vijayavenkataraman, S. (2022). Recent developments in the application of machine-learning towards accelerated predictive multiscale design and additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2141653>.

14. Makedon, V.V., Bailova, O.O. (2023). Planuvannya i orhanizatsiya vprovadzhennya syfrovyykh tekhnolohiy v diyalnist promyslovykh pidpryyemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences"*, 47, 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.

15. Nikooharf, M.H. et al. (2024). Machine learning in polymer additive manufacturing: a review. *International Journal of Material Forming*, 17. DOI: 10.1007/s12289-024-01854-8.

Отримано 07.01.2025

UDC 681.62:621.791.92

Mykola Zenkin¹, Oleksandr Shvedchenko²

¹Doctor of Sciences in Engineering, Professor

Professor of the Department of Printing Machines and Automated Complexes

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: nikolay_zenkin@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>. ResearcherID: AHB-4549-2022

²Postgraduate Student of the Department of Printing Machines and Automated Complexes

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shvedchenko.sasha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3649-1276>

THE INFLUENCE OF DESIGN FEATURES OF MECHANICAL DRIVES OF ROLL-WRAP PRINTING MACHINES ON THE ACCURACY OF COLOR REGISTRATION

The article presents a detailed study of the design features of mechanical drives of roll-wrap printing machines and their influence on the accuracy of color matching in multi-color printing, which is a critical factor in ensuring high quality printed products. The study analyzed the key factors that affecting the stability of printing machines, in particular, the dynamic characteristics of mechanical drives, geometric deformations of printing unit components, as well as the level of vibration generated in actuators during operation. The work identified the main sources of printing defects caused by insufficient accuracy of ink matching due to structural defects of mechanical drives, and assessed the impact of low-frequency vibrations and thermal-mechanical deformations on the stability of printing systems, which allowed us to identify the main areas for improving drive designs to increase their efficiency. On the basis of the results obtained, the need for a theoretical model of the movement of the conveyor elements, taking into account the dynamic characteristics, the geometric features of the drive designs and their impact on the accuracy of the ink transfer process, has been demonstrated. The work developed a system of differential equations that allows not only to predict the behavior of printing systems under various conditions, but also to optimize their operation in accordance with modern requirements of the printing industry. The introduction of hybrid drive systems that combine mechanical and electronic components is proposed, which contributes to a significant reduction in the level of vibrations and an increase in the accuracy of ink matching. In addition, it is recommended to modernize existing drive systems using numerical modeling algorithms, which will allow automating the ink transfer process and ensuring stable operation of printing machines in a wide range of modes. The results of the study provide a scientifically sound basis for further improvement of the designs of web-fed printing machines, which will contribute to improving the quality of printed products in accordance with modern requirements and industry standards.

Keywords: web-fed printing machines; mechanical drives; ink matching accuracy; vibrations and oscillations; ink transfer; design optimization.

Fig.: 2. References: 15.