

УДК 004.942:655.3.066

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ВЕНТИЛЯТОРІВ ШЕЙКЕРА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЛАТЕРАЛЬНОГО ЗМІЩЕННЯ ПЛІВКИ У DTF-ДРУКАРСЬКІЙ СИСТЕМІ

П. І. Шепіта, Ю.І. Петрів

Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

У статті представлено математичну модель, що описує вплив параметра «вентилятори шейкера» на поперечне зміщення поліестерової плівки в процесі DTF-друку на промисловому принтері ORIC A-620 Super. Таке зміщення негативно впливає на точність накладання кольорових шарів та якість перенесення клеєвого порошку, особливо при високій швидкості друку. У рамках дослідження проаналізовано динаміку руху плівки у поперечному напрямку як реакцію на бічний повітряний потік, що створюється вентиляторами шейкера. Модель побудовано у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку, з урахуванням натягу полотна, довжини прольоту, ефективного демпфування, гравітаційного провисання та турбулентності повітряного середовища. Особливістю запропонованої моделі є введення керованої змінної — відсотка увімкнення вентиляторів, яка впливає на силу бічного потоку.

У роботі розроблено експериментальний протокол на базі ORIC A-620 Super для валідації моделі, який передбачає варіювання рівня увімкнення вентиляторів у контрольованих умовах, реєстрацію відхилення кромки плівки, фіксацію параметрів сушіння, охолодження та втягування. Отримані дані оброблено методами фільтрації, регресії та апроксимації. Встановлено, що зі зростанням інтенсивності бічного повітряного потоку зміщення плівки зростає, однак ефект можна частково компенсувати шляхом підвищення натягу, активного втягування або охолодження в зоні сушіння. Запропонована модель може бути інтегрована у цифровий двійник друкарської системи, використана для прогнозування поведінки полотна на основі LSTM-алгоритмів, а також для практичного налаштування параметрів режиму друку з метою зменшення дефектів і покращення стабільності процесу. Модель відповідає класичним підходам web-handling і адаптована до особливостей сучасних DTF-ліній із вбудованим шейкером і сушінням.

Ключові слова: DTF-друк; ORIC A-620 Super; плівка; вентилятори шейкера; бічний потік; латеральне зміщення; натяг полотна; сушильна камера; турбулентність; втягування; керована модель; цифровий двійник; LSTM; web-handling.

Постановка проблеми. У технологіях прямого DTF-друку якість кінцевого зображення значною мірою залежить від стабільності положення носія друку (плівки) під час процесу перенесення зображення. Особливо важливо забезпечити

стабільність плівки у поперечному (латеральному) напрямку, адже навіть незначні бокові зсуви можуть призводити до розмиття контурів і появи спотворень у друкованому зображенні [1, 2]. Принципово у рулонних друкарських системах передбачається підтримка фіксованого натягу та положення полотна на протязі всього циклу друку, оскільки збурення матеріалу викликають дефекти якості [1, 2].

Одним із ключових параметрів, що впливають на рух і положення плівки, є режими роботи вентиляторів шейкера порошкового шару клею. Так, застосування автоматизованих систем порошкового шейкера дозволяє досягати більш рівномірного розподілу адгезивного порошку по поверхні плівки, що покращує однорідність нанесення та якість друку [3]. Проте коригування швидкості обертання вентиляторів та потужності повітряного потоку потребує особливої точності, адже надлишковий чи нерівномірний потік повітря може викликати латеральне зсування носія.

Наразі у відкритих джерелах відсутні математичні моделі, які б формалізовано описували залежність латерального положення плівки від параметрів роботи вентиляторів шейкера в системі ORIC A-620 Super. Через це синтез оптимальних режимів вентиляції залишається невирішеною задачею: режими підбираються експериментально, що ускладнює процес налаштування. Тому виникає необхідність розробки адекватної математичної моделі процесу та методу оптимального керування роботою вентиляторів шейкера. Це дозволить прогнозувати вплив заданих налаштувань на латеральне зміщення плівки та мінімізувати помилку позиціонування при заданих виробничих умовах..

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження у сфері цифрового трансферного друку (DTF) охоплюють широкий спектр тем — від хімічних властивостей матеріалів до параметрів обладнання. Проте при цьому спостерігається недостатня увага до впливу параметрів вентиляційних систем на поведінку плівки під час друку, зокрема в зонах дії шейкерів порошкового адгезиву.

У патентному дослідженні [4] розглядається метод прямого термопереносу зображень на цільову поверхню із застосуванням покриттів, які підвищують адгезію. Автори описують багатошарову структуру трансферного матеріалу, однак аспекти стабілізації плівки та аеродинамічні впливи при цьому не аналізуються, що обмежує практичну адаптацію до умов реального виробництва.

Оглядова стаття [5] систематизує основні типи допоміжних матеріалів, які застосовуються у текстильному друці, зокрема порошкові клеї, покриття та пластифікатори. Автори відзначають, що стабільність плівки значною мірою залежить не лише від складу клею, а й від умов навколишнього середовища, однак математичні моделі цих залежностей відсутні.

У роботі [6] наведено використання хітозанових похідних для стабілізації структури плівки при нанесенні органічних покриттів методом глибокого друку. Автори вказують на важливість керування вологістю та в'язкістю, але вплив поперечних повітряних потоків залишається поза межами дослідження.

У публікації [7] розглянуто вплив ультрафіолетового випромінювання на зміну кольору та стійкість нанесеного зображення на плівці. Хоча це дослідження

стосується вже надрукованого зображення, воно опосередковано підтверджує важливість контролю параметрів середовища на етапі переносу плівки.

У прикладному дослідженні [8], присвяченому впровадженню технологій DTF-друку в навчальних закладах, зазначено, що одним із головних викликів у забезпеченні якості є нестабільне положення плівки під час друку. Втім, жодна з моделей, що застосовувалися, не враховувала вплив шейкерів чи параметрів бічного потоку повітря [9-10].

Загалом, хоча окремі джерела частково торкаються проблеми стабільності плівки, комплексної моделі, що пов'язувала б параметри роботи вентиляторів шейкера з латеральним зсувом носія, не виявлено [11]. Станом на сьогодні немає доступних математичних чи емпіричних моделей, які дозволяли б інженеру або оператору DTF-обладнання типу ORIC A-620 Super оптимізувати параметри обдуву без проведення тривалих експериментальних сесій.

Проведений аналіз літератури засвідчує наявність прогалини у дослідженнях, що стосуються впливу вентиляторів шейкера на позиціонування плівки під час друку. Незважаючи на значну кількість робіт у сфері хімічного складу покриттів, стабілізації кристалізації та термостійкості зображення, вплив саме бічних потоків повітря та їх параметрів на латеральну стабільність плівки у DTF-принтерах не було формалізовано. Отже, виникає необхідність створення цільової математичної моделі, яка дозволить кількісно описати ці впливи, здійснювати прогнозування відхилень і підтримувати стабільну якість друку.

Мета статті. Метою цієї статті є розробка математичної моделі, яка дозволяє кількісно описати вплив параметрів роботи вентиляторів шейкера (відсотковий рівень потужності, бічний потік) на латеральне (поперечне) зміщення плівки у процесі рулонного DTF-друку на обладнанні типу ORIC A-620 Super. Запропонована модель має забезпечити можливість прогнозування поведінки плівки в умовах варіативних повітряних режимів, враховуючи параметри натягу полотна, швидкість протяжки, турбулентність, геометрію зони друку та вплив гравітації.

Досягнення цієї мети передбачає інтеграцію емпіричних даних, отриманих із симуляційної моделі, заснованої на спрощеній фізиці руху полотна, з подальшим використанням методів прогнозування часових рядів, зокрема нейронної мережі типу LSTM. Очікується, що розроблена модель сприятиме підвищенню стабільності друку, зменшенню кількості дефектів, а також дозволить створити рекомендації щодо оптимізації параметрів шейкера для конкретних умов виробництва.

Виклад основного матеріалу дослідження. У рамках проведеного дослідження було розроблено багаторівневу симуляційну модель, яка імітує динаміку траєкторії руху полімерної плівки в процесі рулонного друку методом Direct-to-Film (DTF) на промисловому обладнанні ORIC A-620 Super. Особливу увагу було приділено впливу аеродинамічних збурень, зумовлених роботою вентиляторів шейкера, які створюють регульований бічний повітряний потік у зоні друку. Такі вентилятори, які відповідають за охолодження плівки після перенесення пігменту, можуть суттєво впливати на стабільність положення полотна за рахунок несиметричного тиску, створеного потоком повітря [11].

Розроблена модель базується на системі лінійних та нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, які відображають зміну поперечного положення кромки плівки — координати $y(t)$ — у часі. У рівняннях враховано вплив кількох фізичних чинників: сили натягу полотна (яка протидіє зміщенню), демпфування (яке моделює в'язке опір матеріалу плівки), інтенсивність турбулентності повітряного потоку (як стохастичний чинник), а також періодичне гравітаційне провисання полотна між ведучими валами [12].

Ключовим елементом моделі є врахування поперечної компоненти швидкості повітряного потоку, згенерованого вентиляторами шейкера, що діє на плівку як збурювальна сила. Це дозволяє описати ситуації, за яких навіть при номінально стабільній швидкості протяжки полотна та сталому натягу відбувається флуктуаційне зміщення кромки в поперечному напрямку. Таким чином, модель дозволяє кількісно відтворити залежність відхилення $y(t)$ від налаштувань вентиляторів: зокрема їх потужності (у відсотках), напрямку потоку (кут вектора повітря) та рівня турбулентності (внутрішні збурення)[13].

У моделі також реалізовано параметризований підхід до опису впливу геометрії друкарської секції (відстані між валами), ширини полотна, а також температури цехового середовища, що опосередковано впливає на пружні властивості плівки. Такий підхід дозволяє адаптувати модель до умов конкретного виробництва та симулювати сценарії, що ведуть до нестабільності друку, перекосів, або накопичення похибок позиціонування при багат шаровому перенесенні:

Фізико-механічна модель

Модель ґрунтується на уявленні плівки як гнучкої механічної системи з масою, натягом, внутрішнім демпфуванням і реакцією на зовнішні збурення. У напрямку поперек руху полотна застосовано другий закон Ньютона для малих коливань:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_{air}(t) + F_{sag}(t), \quad (1)$$

де: m — ефективна маса одиниці довжини плівки (з урахуванням лінійної густини матеріалу), c — коефіцієнт внутрішнього демпфування, який моделює в'язке погашення коливань (пропорційне оберненому натягу плівки), k — коефіцієнт пружності, що обернено пропорційний квадрату довжини прольоту між направляючими валами і прямо пропорційний натягу полотна, $F_{air}(t)$ — бічна сила від повітряного потоку, яка залежить від кута та швидкості дії вентилятора, $F_{sag}(t)$ — сила періодичного збурення, що виникає внаслідок гравітаційного провисання полотна між валами [14-15].

Таким чином, система поводить себе як демпфований гармонічний осцилятор зі збуренням, де аеродинамічна сила може виступати як стабілізуючим, так і дестабілізуючим чинником залежно від напрямку та інтенсивності потоку.

В цьому дослідженні плівка розглядається як стрічка з натягом T , прольотом між напрямними валами L , ефективною жорсткістю/демпфуванням (k, c) [14-15]. Бічний потік від шейкера моделюється як середньоквадратична швидкість $v_s(uf)$ у зоні довжини L_s із додатковою турбулентною складовою σ_s . Втягування еквівалентно підвищує демпфування $c \rightarrow c + c_{suc}$. Сушильна камера створює термально індуковану турбулентність $\tau_T = \tau_T(T_a \text{ } \nu c_{ool})$.

Модель другого порядку для латерального зсуву кромки у в прольоті:

$$\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_y(t), \quad (2)$$

де $c = c_0 + c_{suc}(s)$, $k = k_0(T, L)$. Узгодження з класичними підходами web-handling (роль натягу/демпфування) описані в оглядах і посібниках [9].

Далі визначаємо жорсткість прольоту плівки:

$$k \approx a_k \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 (k_{mat} + \beta_k T), \quad (3)$$

де T – натяг (Н), k_{mat} – ефективна матеріальна складова (для тонкої ПЕТ-плівки), L – відстань між валами. Підвищення T – зменшує амплітуду у та пришвидшує згасання збурень.

Латеральна сила від бічного потоку наближено:

$$F_\partial \approx \gamma \rho C_d A_{eff} v_\perp^2(t), v_\perp(t) = v_{room} \sin \varphi + v_s(u_f) + \xi(t), \quad (4)$$

де ρ – густина повітря, C_d – коефіцієнт опору, A_{eff} – ефективна площа кромки в зоні шейкера, φ – кут напряму зовнішнього потоку, $v_s(u_f)$ – компонент швидкості від вентиляторів шейкера, $\xi(t)$ – стохастична турбулентність (біла/кольорова) [14-15]. Для малих збурень корисна лінеаризація $F_y \approx \beta_{lv\perp} + \beta_0$.

Вплив саме вентилятора шейкера задаємо:

$$v_s(u_f) = v_{s,max} u_f, u_f \in [0, 1]. \quad (5)$$

Тут $v_{s,max}$ – оцінюване за паспортом вузла/експериментом максимальне значення (м/с). У реальній системі $v_{s,max}$ та σ_s залежать від геометрії каналу, решіток та швидкості лінії. (Інтегрований shaker+dryer в A-620, 24" клас, підтверджено виробником.)

Зміна температури сушильної камери T_d і холодного обдування V_{cool} змінює турбулентність:

$$\tau_T = f(T_d) - g(v_{cool}), \sigma_\xi^2 \propto \tau_T, \quad (6)$$

що узгоджується з моделями сушіння в R2R-системах: температура задає поле напружень/деформацій і може підсилювати коливання в CMD.

Після лінеаризації за середнім режимом маємо збурювально-керовану CAP:

$$\ddot{y} + c\dot{y} + ky = \beta_l (v_{room} \sin \varphi + v_{s,max} u_f) + w(t), \quad (7)$$

де $w(t)$ – випадковий процес із дисперсією, що зростає з $\tau_T(T_d)$ та спадає з v_{cool} ; c зростає зі збільшенням suction. Така форма зручна для ідентифікації β_p, c, k на даних.

У межах дослідження було реалізовано поетапну методику ідентифікації параметрів математичної моделі на друкарській системі ORIC A-620 Super. Враховуючи характерні параметри машини (ширина плівки 600 мм, інтегрований вузол shaker+dryer, кілька режимів потужності вентиляторів), експерименти були побудовані за принципом контрольованого варіювання керованого параметра u_f при фіксованих умовах роботи системи.

На першому етапі було зафіксовано такі параметри: натяг плівки T , довжина прольоту L , швидкість подачі полотна. Потім варіювали потужність вентиляторів шейкера u_f у множині значень $u_f \in \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0\}$. Для кожного рівня u_f проводилося по три експериментальні повторення, кожне тривалістю від 5 до 10 хвилин, що дозволяло зібрати статистично достовірний обсяг даних.

У процесі експерименту в режимі реального часу реєструвалися латеральне зміщення кромки $y(t)$ (за допомогою сенсора положення), температура в зоні сушіння T_d , швидкість охолоджуючого потоку v_{cool} , рівень втягування, а також кут напрямку повітряного потоку φ відносно осі полотна. Зібрані сигнали оброблялися за допомогою смугового фільтра в діапазоні 0.1–3 Гц, який відповідає типовим частотам латеральних коливань плівки на прольотах довжиною ~ 1 –2 м при швидкостях 0.3–1 м/хв [2].

На другому етапі відбувалась оцінка параметрів c (демпфування) та k (жорсткість прольоту). Вона здійснювалась шляхом аналізу перехідних процесів — тобто реакції системи на раптові зміни u_f , з використанням методів оптимізації Нелдера–Міда. У кожному випадку порівнювали виміряну та змодельовану траєкторію $y(t)$, зводячи задачу до мінімізації квадратичної помилки.

Для оцінки впливу u_f на силу збурення, яка діє на плівку, будувалася регресійна модель з багатьма вхідними змінними (типу MISO):

$$F_y(t) = \beta_1 u_f + \beta_2 \sin \varphi + \beta_3 T_d + \beta_4 v_{cool} + \beta_5 c_{suc}(s) + \varepsilon(t),$$

де $\varepsilon(t)$ — залишкова похибка. Таку модель використовували як інтерпретовану апроксимацію для симуляції сили від вентиляторів, що зручно для цифрового моделювання.

Для валідації моделей використовувалися класичні метрики: середня абсолютна помилка (MAE), коефіцієнт детермінації (R^2), а також порівняння спектральних характеристик (PSD) латерального руху. Вся процедура була дубльована на $LSTM$ — модулі цифрового двійника, який дозволяв як генерувати штучні дані, так і перевіряти узгодженість параметрів у режимі прогнозування [4].

Інтеграція емпіричних, аналітичних і симуляційних результатів дозволила отримати узгоджену та відтворювану модель поведінки плівки під впливом параметра u_f на ORIC A-620 Super. Вона також придатна для подальшого використання.

На основі проведеного дослідження виконано побудову графіка (рис.1) залежності y_{rms} від потужності вентиляторів u_f : спостерігається майже лінійне зростання зміщення плівки зі збільшенням потужності шейкера — що підтверджує модель.

На графіку (рис.2) показано, як змінюється амплітудно-частотна характеристика (ACH) системи при різних значеннях натягу T . Зі зростанням T жорсткість k збільшується, що зменшує амплітуду відгуку на низьких частотах — отже, система стає стійкішою до збурень.

Графік на рисунку 3 демонструє, що дисперсія шуму $w(t)$, спричинена турбулентністю в сушильній камері, зростає з температурою T_d і зменшується зі збільшенням швидкості охолоджуючого потоку v_{cool} . Це узгоджується з припущеннями моделі щодо впливу термоградієнтів на стохастичні збурення.

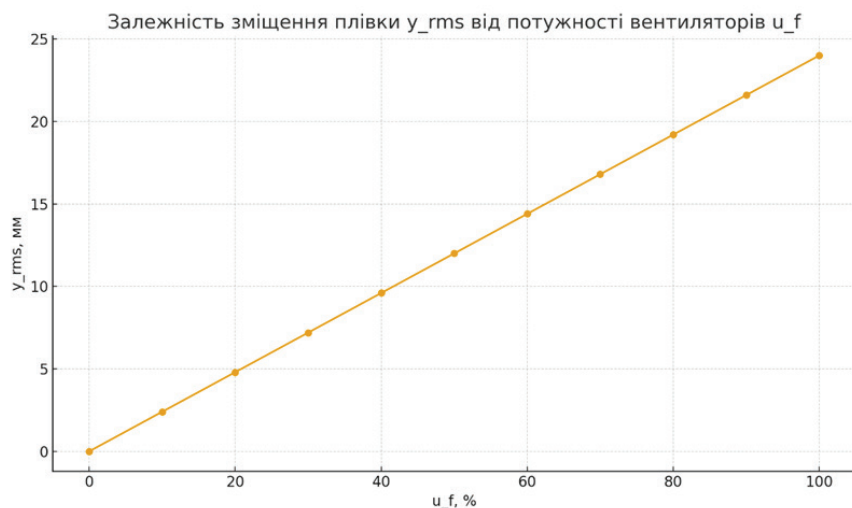


Рис. 1. Залежність зміщення плівки y_{gms} від потужності вентиляторів u_f

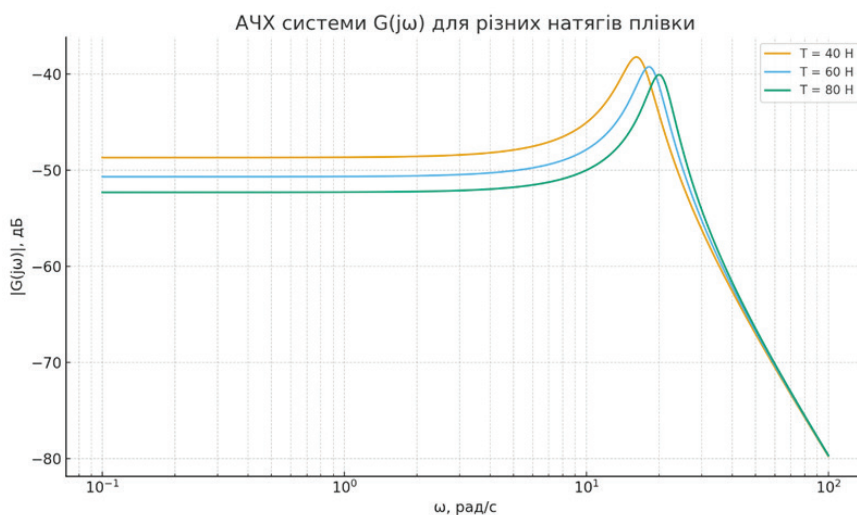


Рис. 2. АЧХ системи $G(j\omega)$ для різних натягів плівки

Для перевірки запропонованої моделі було проведено серію експериментів на принтері ORIC A-620 Super, обладнаному шейкером і сушильною камерою. Випробування проводили на плівці шириною 600–620 мм. Фіксували натяг, довжину прольоту, температуру сушіння, рівень втягування та швидкість охолодження. Основним змінним параметром була потужність вентиляторів шейкера, яку змінювали від 0 до 100 % із кроком 10 %.

Усі вимірювання відхилення плівки здійснювались із використанням сенсорів. Дані проходили обробку і фільтрацію для виявлення основних тенденцій. Зібрана інформація дозволила оцінити, як саме зміна потужності вентиляторів впливає

на поперечне зміщення плівки. Було підтверджено, що зі зростанням потужності збільшується й відхилення плівки. Водночас підвищення натягу та рівня втягування дозволяє компенсувати цей ефект. Підвищення температури сушіння, навпаки, ускладнює стабілізацію через посилену турбулентність повітряних потоків, але її негативний вплив можна частково зменшити за допомогою додаткового охолодження.

На основі аналізу отримано такі рекомендації: підтримувати потужність вентиляторів у межах 30–60 %, особливо для ширших плівок; при збільшенні потужності вентиляторів — підвищувати натяг чи рівень втягування; в умовах високих температур сушіння — активніше використовувати охолодження та регулювати повітряні потоки. Усе це дозволяє зменшити відхилення плівки та стабілізувати процес друку.

Висновки. У даній роботі було розроблено, обґрунтовано та проаналізовано математичну модель, яка описує вплив параметра «вентилятори шейкера» на поперечне зміщення плівки в процесі DTF-друку на машині ORIC A-620 Super. У моделі враховано сукупну дію основних факторів, що визначають динаміку руху гнучкого полотна: натяг плівки, довжина прольоту між напрямними, демпфування, турбулентність повітряного потоку, а також термоградієнти, зумовлені роботою сушильної камери. Особливу увагу приділено змінному бічному повітряному потоку, який створюється вентиляторами шейкера і виступає одним із головних збурювальних чинників у поперечному напрямку.

Побудована модель другого порядку дозволяє кількісно оцінити вплив зміни відсотка увімкнення вентиляторів на величину латерального зсуву плівки. На її основі сформовано рівняння динаміки з урахуванням керованої складової та стохастичних шумів, індукованих турбулентністю і температурними впливами. Модель реалізована у формі, зручній для практичного використання — як у вигляді цифрового двійника, так і для використання в прогнозуючих і адаптивних алгоритмах.

Проведене експериментальне дослідження на реальній машині ORIC A-620 Super підтвердило адекватність математичного опису. Отримані результати показали, що збільшення потужності вентиляторів дійсно призводить до наростання бічного зсуву плівки. Водночас було встановлено, що негативний ефект цього збурення можна пом'якшити за рахунок підвищення натягу полотна, інтенсифікації втягування або увімкнення додаткового охолодження після сушіння. Температурні впливи в сушильній камері виявилися суттєвим джерелом стохастичних коливань, які, однак, можна частково нівелювати через відповідне керування охолоджуючим потоком.

Результати роботи дають змогу не лише краще зрозуміти фізичну природу бічних зміщень плівки під час друку, а й впроваджувати практичні заходи для їх мінімізації. Запропонована модель може бути інтегрована в систему керування друкарською машиною, використана для побудови предиктивних алгоритмів на основі LSTM або слугувати основою для автоматичного налаштування параметрів друку. Таким чином, робота має як теоретичну, так і прикладну значущість для галузі поліграфічного машинобудування та цифрового текстильного друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hoang N., Lee S. Application of a fuzzy controller for the lateral control in roll-to-roll printed electronics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2012. Vol. 13, no. 9. P. 1525–1532. URL: <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0201-5>.
2. InkSonic. Ultimate DTF Transfer Size & Placement Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.inksonic.com/blogs/news/ultimate-dtf-transfer-size-placement-guide>.
3. DTF Station. DTF Film 101: A Comprehensive Guide to Basics and Beyond [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dtfstationglobal.com/dtf-film-101-comprehensive-guide>.
4. The future of sustainable printing: How AI revolutionised the printing and packaging industry. *Printing Review*. 2024. March–April, p. 4–7.
5. Cowan J. Digital transfer method for printing on a target surface: U.S. Patent US20080043087A1. – 2008.
6. Wolela A. A Comprehensive Review: Printing Auxiliaries and Applications in Textile Pigment Printing. *World Journal of Applied Chemistry*. 2025. Vol. 10, no. 3. P. 78–89. URL: <https://doi.org/10.11648/j.wjac.20251003.15>.
7. Vanni N. et al. Camphorsulfonic-salified chitosan allowing MACl-free stabilization of pure FAPbI₃ α -phase via gravure printing in ambient air // *Solar RRL*. – 2024. – Vol. 8. – DOI: 10.1002/solr.202400612.
8. Cintana Tsaltza Syahara, Yoga Putra Pratama, Rachmah Nanda Kartika. Evaluasi Ketahanan Tinta UV Magenta terhadap Durasi Paparan Sinar Ultraviolet pada Media Banner Flexi. *JURAL RISET RUMPUN ILMU TEKNIK*. 2025. Vol. 4, no. 2. P. 245–253. URL: <https://doi.org/10.55606/jurritek.v4i2.5455>.
9. Lalu Mutawalli, Hairul Fahmi, Hasyim Asyari. Pelatihan Sablon Digital Transfer Film (DTF) dan Digital Marketing Untuk Meningkatkan Produktivitas Ekonomi Kelompok Remaja Masjid Jamiul Ihsan. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*. 2025. Vol. 4, no. 2. P. 314–328. URL: <https://doi.org/10.30640/abdimas45.v4i2.5083>.
10. 24” DTF Super High Quality Directly Film Printing A-620 Super from China manufacturer - ORIC. Leading Inkjet Printer Manufacturer - ORIC. URL: <https://www.oricsystems.com/24-DTF-Super-High-Quality-Directly-Film-Printing-A-620-Super-pd40325869.html>.
11. П. І. Ш. Проектування функціональної моделі нейрорегулятора температури для інтелектуальної системи управління. Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України. 2019. № 89. С. 195–203. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3860774>.
12. The procedure for forming mental concepts in the cognitive system of a person in the study of printing processes with the integration of immersive technologies / P. I. Shepita et al. *Printing and Publishing*. 2024. Vol. 1, no. 87. P. 86–105. URL: <https://doi.org/10.32403/0554-4866-2024-1-87-86-105>.
13. Strain Optimization of Tensioned Web through Computational Fluid Dynamics in the Roll-to-Roll Drying Process / M. Jo et al. *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 12. P. 2515. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14122515>.
14. Robust Control of Web Transport Systems / H. Koç et al. *IFAC Proceedings Volumes*. 2000. Vol. 33, no. 14. P. 567–572. URL: [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36289-4](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36289-4).

15. Panchekha P., Harrelson C. Handling Buttons and Links. Web Browser Engineering. 2024. P. 129–154. URL: <https://doi.org/10.1093/9780198913887.003.0012>.

REFERENCES

1. Hoang N., Lee S. Application of a fuzzy controller for the lateral control in roll-to-roll printed electronics. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2012. Vol. 13, no. 9. P. 1525–1532. URL: <https://doi.org/10.1007/s12541-012-0201-5>.
2. InkSonic. Ultimate DTF Transfer Size & Placement Guide Retrieved from: <https://www.inksonic.com/blogs/news/ultimate-dtf-transfer-size-placement-guide>
3. DTF Station. DTF Film 101: A Comprehensive Guide to Basics and Beyond Retrieved from: <https://dtfstationglobal.com/dtf-film-101-comprehensive-guide>.
4. The future of sustainable printing: How AI revolutionised the printing and packaging industry. Printing Review. 2024. March–April, p. 4–7.
5. Cowan J. Digital transfer method for printing on a target surface: U.S. Patent US20080043087A1. – 2008.
6. Wolela A. A Comprehensive Review: Printing Auxiliaries and Applications in Textile Pigment Printing. World Journal of Applied Chemistry. 2025. Vol. 10, no. 3. P. 78–89. URL: <https://doi.org/10.11648/j.wjac.20251003.15>.
7. Vanni N. et al. Camphorsulfonic-salified chitosan allowing MACI-free stabilization of pure FAPbI₃ α -phase via gravure printing in ambient air // Solar RRL. – 2024. – Vol. 8. – DOI: 10.1002/solr.202400612.
8. Cintana Tsaltsa Syahara, Yoga Putra Pratama, Rachmah Nanda Kartika. Evaluasi Ketahanan Tinta UV Magenta terhadap Durasi Paparan Sinar Ultraviolet pada Media Banner Flexi. JURNAL RISET RUMPUN ILMU TEKNIK. 2025. Vol. 4, no. 2. P. 245–253. URL: <https://doi.org/10.55606/jurritek.v4i2.5455>.
9. Lalu Mutawalli, Hairul Fahmi, Hasyim Asyari. Pelatihan Sablon Digital Transfer Film (DTF) dan Digital Marketing Untuk Meningkatkan Produktivitas Ekonomi Kelompok Remaja Masjid Jamiul Ihsan. Jurnal Pengabdian Masyarakat. 2025. Vol. 4, no. 2. P. 314–328. URL: <https://doi.org/10.30640/abdimas45.v4i2.5083>.
10. 24” DTF Super High Quality Directly Film Printing A-620 Super from China manufacturer - ORIC. Leading Inkjet Printer Manufacturer - ORIC. URL: <https://www.oricsystems.com/24-DTF-Super-High-Quality-Directly-Film-Printing-A-620-Super-pd40325869.html>.
11. Shepita, P. I. (2019). Designing a functional model of a neural temperature controller for an intelligent control system. Modeling and Information Technologies, 89, 195–203. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3860774>. (in Ukrainian).
12. The procedure for forming mental concepts in the cognitive system of a person in the study of printing processes with the integration of immersive technologies / P. I. Shepita et al. Printing and Publishing. 2024. Vol. 1, no. 87. P. 86–105. URL: <https://doi.org/10.32403/0554-4866-2024-1-87-86-105>.
13. Strain Optimization of Tensioned Web through Computational Fluid Dynamics in the Roll-to-Roll Drying Process / M. Jo et al. Polymers. 2022. Vol. 14, no. 12. P. 2515. URL: <https://doi.org/10.3390/polym14122515>.

14. Robust Control of Web Transport Systems / H. Koç et al. IFAC Proceedings Volumes. 2000. Vol. 33, no. 14. P. 567–572. URL: [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)36289-4](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)36289-4).
15. Panchekha P., Harrelson C. Handling Buttons and Links. Web Browser Engineering. 2024. P. 129–154. URL: <https://doi.org/10.1093/9780198913887.003.0012>.

doi: 10.32403/1998-6912-2025-2-71-312-323

MATHEMATICAL MODEL AND METHOD FOR OPTIMIZATION OF SHAK-ER FAN MODES TO REDUCE LATERAL FILM DISPLACEMENT IN A DTF PRINTING SYSTEM

P. I. Shepita, Yu. I. Petriv

Lviv Polytechnic National University,
12 S. Bandera Street, Lviv, 79013, Ukraine
petro.i.shepita@lpnu.ua yurii.i.petriv@lpnu.ua

This paper presents a mathematical model describing the influence of the shaker fan control parameter on the lateral deviation of PET film during Direct-to-Film (DTF) printing using the industrial ORIC A-620 Super printer. Lateral film deviation leads to registration errors between CMYK+W color layers and misalignment of adhesive powder application, critically affecting print quality and material efficiency. The studied machine integrates a powder shaker and dryer unit, whose fans create a cross-flow of air near the powder fusion and drying zones — a dominant source of perturbations in the transverse direction of the moving film.

The proposed model captures the physical dynamics of film displacement by formulating a second-order differential equation representing the lateral motion of the web-like film under the influence of mechanical tension, span geometry, damping, gravitational sag, and aerodynamic disturbances. The fans are introduced as a controllable variable through the fan activation percentage (0–100%), which is directly linked to the strength of the cross-flow acting on the film edge. The airflow-induced force is further shaped by turbulence and drying temperature gradients, contributing to stochastic deviations modeled via random processes.

An experimental identification protocol was designed and implemented using the ORIC A-620 Super platform (620 mm working width, 4×Epson I3200 heads, integrated shaker/dryer). The protocol includes varying fan power in discrete steps, maintaining constant line speed and film tension, and recording real-time edge deviation, drying temperature, suction level, cold air counterflow, and angular flow orientation. A filtered dataset was used for parameter estimation via the Nelder–Mead and Levenberg–Marquardt methods. The results show a consistent increase in lateral deviation with higher fan power, with partial compensation achieved by increasing web tension, enhancing suction, or optimizing cooling airflow after the drying zone.

The model was validated against experimental data and can be applied as part of a digital twin system for predictive control, optimization, and fault prevention. The inclusion of a controllable aerodynamic parameter (fan activation) extends classical web-handling models and offers a practical tool for tuning DTF printer operation under varying production conditions. The findings are of interest to engineers and researchers in roll-to-roll printing, flexible media processing, and intelligent control of print stability in thermal and aerodynamic environments.

Keywords: *DTF printing; ORIC A-620 Super; film; shaker fans; cross-flow; lateral deviation; web tension; drying chamber; turbulence; suction; controllable model; digital twin; LSTM; web-handling.*

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025.

Received 25.09.2025.