

УДК 621.372:376.56

МЕТОДИКА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ДРУКОВАНОЇ ПРОДУКЦІЇ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУМІЩЕННЯ ФАРБ

О. В. Шевчук

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

oleksii.v.shevchuk@lpnu.ua

У сучасному видавничо-поліграфічному процесі велику увагу приділяють питанням покращення якості друкованої продукції, беручи до уваги розроблені дослідниками методики. Одним із важливих чинників покращення якості друкованої продукції є вдосконалення процесу суміщення фарб сучасних друкарських машин.

У статті висвітлено методику оптимізації процесу суміщення фарб в сучасних рулонних ротаційних машинах. Подано результати дослідження амплітудних характеристик та частотних властивостей каналів суміщення фарб по першій загальній базовій мітці та поточній базовій мітці при гармонійній зміні натягу паперової стрічки. Висвітлено дослідження перехідних і частотних характеристик суміщення фарб рулонної ротаційної машини.

Доведено, що проходження через ланку чистого запізнювання не міняє вигляд амплітудних характеристик, а частотні властивості каналів суміщення фарб по першій загальній базовій мітці будуть такими ж, як в каналів з результатом похибок суміщення фарб по першій базовій поточній мітці. З погляду якості і точності вимірювання спосіб визначення похибок по загальній базовій мітці пріоритетний, але вибір першої мітки як базової невдалий, бо при цьому амплітуда вимушених коливань суміщення фарб однаково велика по всіх каналах. Тому як базову доцільно розглядати останню мітку, оскільки вона друкується практично за відсутності коливань натягу стрічки. В цьому випадку необхідно здійснювати керування фазами формених циліндрів тих, що подають паперову стрічку на регульовані ділянки. Окрім цього, базова мітка може наноситися всередині машини на другій або третій друкарських секціях. У цьому випадку управління фазами попередніх фарб здійснюється формними циліндрами, що подають стрічку, а керування фазами подальших друкарських секцій здійснюється вивідними формними циліндрами. Це необхідно враховувати при визначенні знаків дій для забезпечення оптимального керування.

Підкреслено важливість вивчення перехідних і частотних характеристик каналів суміщення фарб по останній четвертій базовій фарбі. Показано, що в цьому випадку найбільше динамічне відхилення

спостерігається по першій фарбі, яке складає 0,68 від базового значення. Максимальні відхилення по другій і третій фарбі складають приблизно 0,5 і 0,25 від найбільшого розходження по першій фарбі. Доведено, що спосіб виміру похибок суміщення фарб по останній фарбі забезпечує ефективнішу фільтрацію високочастотних перешкод.

Ключові слова: *стрічкопровідна система, математична модель, симулятор, подовжене зміщення фарб, перехідна характеристика, похибка суцільності фарб.*

Постановка проблеми. Оптимізація процесу суміщення фарб сучасних друкарських, зокрема рулонних ротаційних машин є вагомим чинником покращення якості друкованої продукції. Стрічкопровідні циліндри і робочі органи друкарських машин (форми і друкарські циліндри, ротаційні ножі, перфоратори) можуть мати неузгоджений рух внаслідок люфтів, пружних коливань, зношування кінематичних пар тощо, що призводить до зміщення технологічних операцій у випадку незалежного приводу окремих механізмів. У зв'язку з цим порушується відповідність між положенням рухомої стрічки з віддрукованим на ній зображенням щодо робочих механізмів машини в певний окреслений період часу.

Аналіз та оцінка особливостей суміщення фарб з метою оптимізації процесу та покращення якості друкованої продукції вимагають складних експериментальних досліджень, застосовуючи які можна на виробництві отримати вагомий економічний результат.

Системи автоматичного регулювання фарб на багатофарбових рулонних друкарських машинах є дискретними системами. Дискретність систем обумовлена способом вимірювання зміщення фарб за допомогою рівновіддалених міток, які друкуються на рухомій стрічці, що обумовлює актуальність дослідження перехідних і частотних характеристик суміщення фарб рулонної ротаційної машини. Окремо слід відзначити необхідність дослідження процесу суміщення фарб при гармонійній зміні натягу паперової стрічки рулонної ротаційної машини.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Стрічкопровідна система є основним об'єктом керування рулонної ротаційної машини [2, 4]. При такому підході достатньо встановити залежність зміщення фарб регулюючої дії і основного збурення, а всі інші дії на об'єкт розглядати як збурення на об'єкт [1, 2]. В системі основним збуренням виступає відносне видовження стрічки між сусідніми друкарськими секціями машини. Регулююча дія на об'єкт може здійснюватися за допомогою реєстрового валика або механізму повороту формного циліндра (фазою формного циліндра). Тому і структурні схеми та відповідні їм математичні моделі схем зміщення кольорів будуть різними [2].

Системи автоматизованого управління суміщення фарб дозволяють здійснювати динамічну корекцію процесу поєднання фарб на відбитках в режимі online під час друкування накладу, не виймаючи відбиток з машини і без безпосередньої участі друкаря. Вимірювальні елементи можуть встановлюватися або на виході кожної друкарської секції, або за останньою. Механічні властивості безперервної паперової стрічки суттєво впливають на якість рулонного друку. Тому як об'єкт керування розглядається стрічкопровідна система багатофарбової рулонної друкарської машини

Мета статті – дослідження амплітудних характеристик та частотних властивостей каналів суміщення фарб по першій загальній базовій мітці та поточній базовій мітці при гармонійній зміні натягу паперової стрічки; дослідження перехідних і частотних характеристик суміщення фарб рулонної ротаційної машини.

Виклад основного матеріалу досліджень. Гармонійні зміни натягу паперової стрічки обумовлені биттям рулону, яке проявляє себе на частоті його розмотування $\omega_{p,e_1} = V_p^* / \rho$ (за наявності ексцентриситету e_1) і подвоєній частоті $\omega_{p,e_2} = 2V_p^* / \rho$ (за наявності овальності e_2). Знайдемо реакції процесу суміщення фарб на комбіновану вхідну дію, що є сумою ступінчастої зміни відносного видовження стрічки на номінальну величину $\Delta\varepsilon_0^*$ і гармонійною складовою з 40%-ною амплітудою і частотою розмотування рулону, тобто

$$\Delta\varepsilon_0(t) = \Delta\varepsilon_0^* \cdot l(t) \cdot \sin(\omega_p \cdot t) \quad (1)$$

де $\omega_p = V_p^* / \rho$ - кутова частота розмотування рулону.

Запишемо вираз для вхідного сигналу: $\Delta\varepsilon_0(p) = \frac{\Delta\varepsilon_0^*}{p} + A_{\varepsilon_0} \cdot \frac{\omega_p}{p^2 + \omega_p^2}$ і

визначимо реакцію процесу суміщення фарб, як зворотнє перетворення Лапласа від операторного виразу: $s_{i+1,i}(t) = L^{-1} \left[W_{\Delta\varepsilon_0 s_{i+1,i}}(p) \cdot \Delta\varepsilon_0(p) \right]$.

Передавальні функції суміщення фарб по каналах « $\Delta\varepsilon_0 \rightarrow s_{i+1,i}$ » ($i = 1, 2, 3$) описуються виразами

$$W_{\Delta\varepsilon_0 \Delta s_{21}}(p) = k_\varepsilon \cdot \left(\frac{1 - e^{-pT_i}}{Tp} - \frac{1}{Tp + 1} \right)$$

$$W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{32}}(p) = k_\varepsilon \cdot \left(\frac{1 - e^{-pT_i}}{Tp} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot \frac{1}{Tp+1}$$

$$W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{43}}(p) = k_\varepsilon \cdot \left(\frac{1 - e^{-pT_i}}{Tp} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot \frac{1}{(Tp+1)^2}$$

На рис.1 показана схема ділянки паперової стрічки між i -тою та $i+1$ -ою папероведучими парами, які містять N задрукованих відбитків. На даному рисунку використані наступні позначення: ПВП _{i} — i -та папероведуча пара, d — діаметр циліндрів ПВП, L_j — довжина шляху паперової стрічки між точками А і В, φ_i і φ_{i+1} — фази i -го та $i+1$ -го формних циліндрів, N - число відбитків, які задруковуються на i -тій ділянці паперової стрічки, M_i — та, M_{i+1} - мітки i -того та $(i+1)$ -го формних циліндрів.

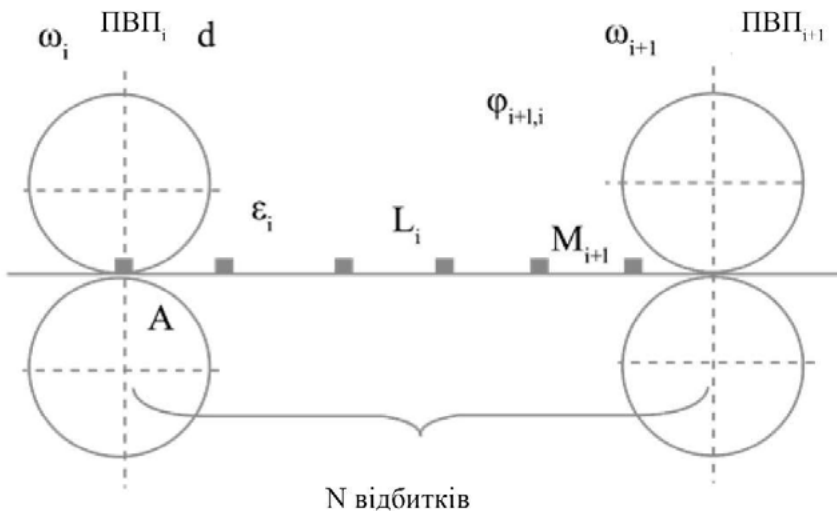


Рис. 1 Ділянка паперової стрічки із задрукованими відбитками

Якщо у вихідному положенні різниця фаз між i -тими та $i+1$ циліндрами рівна 0, тоді рівняння статки приймає вигляд:

$$L_i = \pi d N.$$

Звідси випливає, що похибка суміщення фарб може порушуватися за рахунок зміни довжини ділянки L_i . Якщо довжина шляху стрічки L_i не кратна сумарній довжині N відбитків, то потрібно встановлювати початкову різницю фаз $\Delta \varphi_{i,i+1} = \varphi_{i+1} - \varphi_i$

$$(d/2) \cdot (\varphi_{i+1} - \varphi_i) = \pi d N - L_i.$$

Розглянемо координату $S_{i+1,i}$ що показує зсув мітки M_{i+1} відносно мітки M_i , тобто

$$S_{i+1,i} = L_i - \pi d N + (d/2) \cdot (\varphi_{i+1} - \varphi_i).$$

Рівняння (3) враховує зміну зміщення фази $i+1$ -го формного циліндра відносно фази i -го формного циліндра i . Шукаємо довжину нерозтягнутої паперової стрічки $dL_{0,i}$, що подається на дану ділянку через вхідну стрічковедучу пару за нескінченно малий час dt

$$dL_{0i} = \frac{V_i}{1 + \varepsilon_{i-1}} dt.$$

Тоді за час $T_i = L_i/V_i$, що відповідає часу руху стрічки по даній ділянці, довжина паперової стрічки в ідеалі дорівнює:

$$L_{0i}(t) = \int_{t-T_i}^t \frac{V_i}{1 + \varepsilon_{i-1}} dt.$$

Врахуємо пружну деформацію паперової стрічки ε_i і запишемо закон зміни поточної довжини задрукованої стрічки

$$LN_i(t) = (1 + \varepsilon_i) \cdot \int_{t-T_i}^t \frac{V_i}{1 + \varepsilon_{i-1}} dt.$$

Різниця між довжиною шляху стрічки L_i і поточною довжиною $LN_i(t)$ з врахуванням відносного зміщення фаз $\varphi_{i+1} - \varphi_i$; при поздовжньому суміщенні фарб дає похибку

$$L_i(t) - LN_i(t) + \frac{d}{2}[\varphi_{i+1}(t) - \varphi_i(t - T_i)] = s_{i+1,i}(t).$$

Рівняння (7) встановлює динамічний зв'язок похибки суміщення фарб S_{i+1} по сусідній мітці в залежності від довжини шляху по якому рухається паперова стрічка $L_i(t)$, та довжини надрукованих відбитків $LN_i(t)$, і поточної різниці фаз вхідного $\varphi_i(t - T_i)$ і вихідного $\varphi_{i+1}(t)$ формних циліндрів даної i -ї ділянки паперової стрічки.

Підставивши у формулу (7) значення поточної довжини паперової стрічки, яке ми визначили за формулою (6), отримуємо інтегральне рівняння поздовжнього суміщення фарб

$$L_i(t) - (1 + \varepsilon_i) \cdot \int_{t-T_i}^t \frac{V_i}{1 + \varepsilon_{i-1}} dt + \frac{d}{2}(\varphi_{i+1}(t) - \varphi_i(t - T_i)) = s_{i+1,i}(t).$$

В цьому рівнянні похибка суміщення фарб $s_{i+1,i}$ може змінюватися за рахунок зміни шляху по якому рухається стрічка L_1 , на величину ΔL_1 , та за рахунок зміни положення реєстрового валика. Відносні видовження ε_1 та ε_{i+1} міняються при змінах натягу, а різниця фаз $\Delta\varphi_{i+1,i} = \varphi_{i+1} - \varphi_i$; - залежить від поточних значень фази i -го і $i+1$ -го формених циліндрів. Варто відзначити, що часто в рівняннях суміщення фарб розглядають відносне зміщення фази $\Delta\varphi_{i,i+1} = \varphi_{i+1} - \varphi_i$. Досліджено що дане твердження виконується лише для сталого режиму. Проте в динаміці робочої машини різницю фаз надрукованих міток ми повинні враховувати із зміщенням за часом, тобто $\Delta\varphi_{i,i+1}(t) = \varphi_{i+1}(t) - \varphi_i(t - T_i)$, оскільки мітки на вхідній стрічковедучій парі друкуються раніше, на час T_1 .

Розглянемо номінальний режим суміщення фарб, який характеризується сталими значеннями змінних:

$$L_i = L_i^*, \varepsilon_{i-1} = \varepsilon_i = \varepsilon^*, V_i = V^*, \varphi_{i+1} = \varphi_{i+1}^*; \varphi_i = \varphi_i^*; s_{i+1,i} = s_{i+1,i}^*,$$

із номінальним часом руху стрічки по i -тій ділянці $T_1^* = L_1^*/V^*$

Підставимо ці значення в рівняння (8)

$$L_i^* - (1 + \varepsilon^*) \int_{t-T_i^*}^t dt + \frac{d}{2}(\varphi_{i+1}^* - \varphi_i^*) = s_{i+1,i}^*.$$

Після проведення перетворень отримуємо залежність

Знайдемо значення інтеграла $V^* \int_{t-T_i^*}^t dt = L_i^*$. Тоді статичне рівняння суміщення фарб приймає наступний вигляд:

$$\frac{d}{2} \cdot (\varphi_{i+1}^* - \varphi_i^*) = s_{i+1,i}^*.$$

В результаті дослідження виявили, що статична похибка суміщення фарб залежить від початкового зміщення фаз формених циліндрів. Застосовуючи рівняння (2), ми можемо записати похибку суміщення фарб через довжину ділянки паперової стрічки, тобто

$$L_i^* - \pi dN = s_{i+1,i}^*$$

Досліджено, що дане рівняння аналогічне рівнянню статички (1). Тоді стає очевидним, що рівняння (10) може бути отримане із загального динамічного рівняння суміщення фарб (8), яке враховує відносні деформації стрічки на виході і вході паперуведучої пари та інтегруючи властивості друкарського апарату.

При моделюванні досліджуємо випадок, коли зміна відносного видовження паперової стрічки на вході першої ділянки є прямокутнім імпульсом, тривалість якого T_ε , складає дві, чотири або вісім постійних часу T ділянки паперової стрічки. Оскільки таку вхідну дію можна представити у вигляді суми двох ступінчастих функцій, зміщених на час T_ε , то реакція процесу суміщення фарб на імпульсну дію може бути визначена як різниця двох перехідних характеристик.

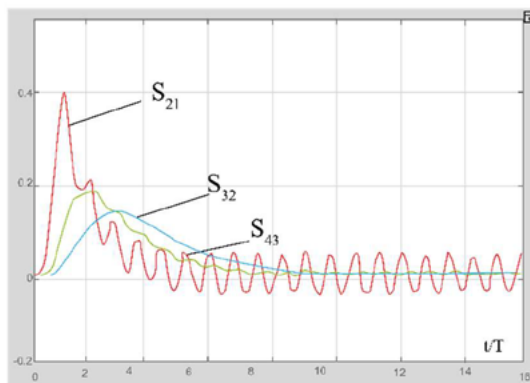


Рис. 2 Перехідні характеристики процесу суміщення фарб по сусідній мітці за наявності гармонійної складової

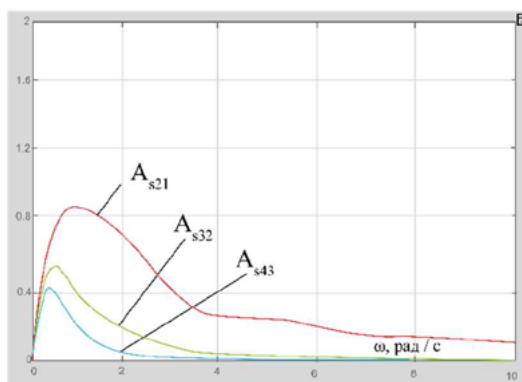


Рис. 3 Амплітудно-частотні характеристики процесу суміщення фарб по сусідній мітці

Досліджено, що найбільша відносна амплітуда сталих коливань спостерігається по другій фарбі: Величина цієї амплітуди складає приблизно близько 10% від максимального піку. В абсолютних одиницях це складає величину $A_{s_{21}} = 0,04 \cdot k_{\varepsilon} \Delta \varepsilon_0^* = 0,1 \text{ мм}$. По третій $\overline{s_{32}(t)}$ і четвертій $\overline{s_{43}(t)}$ фарбі вплив гармонійних коливань не значний.

Знайдемо амплітудно-частотні характеристики процесу суміщення фарб по поточних сусідніх мітках

$$A_{s_{i+1,i}}(\omega) = \left| W_{\Delta \varepsilon_0 s_{i+1,i}}(j \cdot \omega) \right|.$$

Графіки цих характеристик представлені на Рис.2. Якщо на вході діють гармонійні коливання відносного видовження $A_\varepsilon = 0,4 \cdot \varepsilon_0^* = 2,83 \cdot 10^{-4}$, то в результаті виходять наступні значення амплітуд сталих коливання суміщення фарб: $A_{s_{21}}^{ycm} = 0,44 \cdot 2,83 \cdot 10^{-4} = 0,125$ мм,

$$A_{s_{32}}^{ycm} = 0,055 \cdot 2,83 \cdot 10^{-4} = 0,015 \text{ мм} \quad \text{і} \quad A_{s_{43}}^{ycm} = 0,007 \cdot 2,83 \cdot 10^{-4} = 0,0002$$

мм. Таким чином, ми визначили, що амплітуда сталих коливань по поточних сусідніх фарбах зменшується майже в 10 разів по кожній фарбі. Розраховані значення амплітуд сталих, коливань узгоджуються з результатами розрахунку перехідних характеристик, показаних на рис.7.

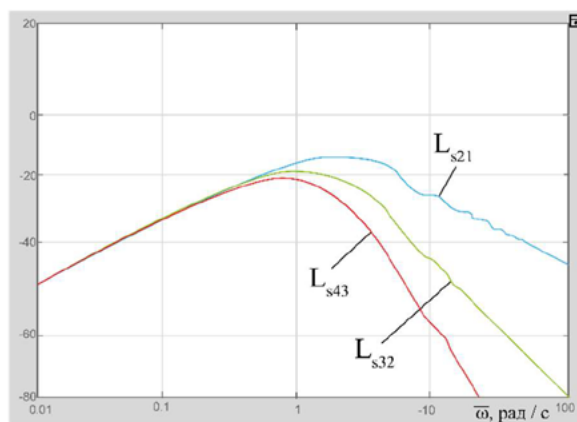


Рис. 4 Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики процесу суміщення фарб по поточній сусідній мітці

Розглянемо відносні логарифмічні частотні характеристики процесу суміщення фарб, прологарифмувавши вираз (5) для амплітудно - частотної характеристики. В результаті отримаємо залежність:

$$\bar{L}_{s_{i+1,j}}(\bar{\omega}) = 20 \cdot \log(A_{s_{i+1,j}}(\bar{\omega})/k_\varepsilon)$$

Де $\bar{\omega} = \omega \cdot T$ - відносна частота.

На рис. 3 представлені графіки лінійні амплітудно-частотні характеристики процесу суміщення фарб по сусідніх поточних мітках. Ми бачимо, що даний динамічний процес має властивості безперервних смугових фільтрів з частотами фільтрації: 0,3рад/с по каналу « $\Delta\varepsilon_0 \rightarrow s_{43}$ » 0,7рад/с по каналу « $\Delta\varepsilon_0 \rightarrow s_{32}$ » і 1рад/с по каналу « $\Delta\varepsilon_0 \rightarrow s_{21}$ ». В області низьких частот лінійні амплітудно-частотні характеристики даних фільтрів мають однаковий нахил +20дБ/дек, а в області високих частот, вони мають відповідно

нахили:- 20дБ/дек для каналу « $\Delta\varepsilon_0 \rightarrow s_{21}$ » -40дБ/дек для каналу « $\Delta\varepsilon_0 \rightarrow s_{32}$ » і -60дБ/дек для каналу « $\Delta\varepsilon_0 \rightarrow s_{43}$ »

Передавальні функції каналів суміщення фарб по першій базовій мітці мають вигляд:

$$W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{31}}(p) = W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{32}}(p) + W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{21}}(p) \cdot e^{-Tp}$$

$$W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{41}}(p) = W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{43}}(p) + W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{32}}(p) \cdot e^{-Tp} + W_{\Delta\varepsilon_0\Delta s_{21}}(p) \cdot e^{-2Tp}$$

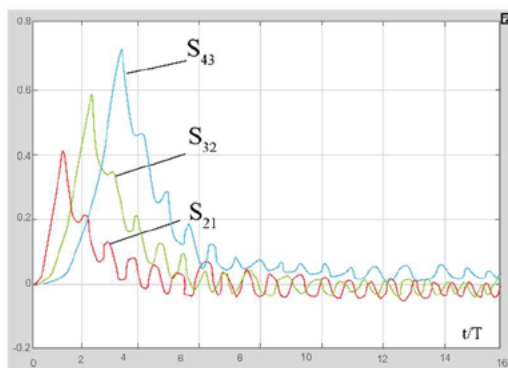


Рис.5 Перехідні характеристики процесу суміщення фарб по першій поточній базовій мітці за наявності гармонійної складової

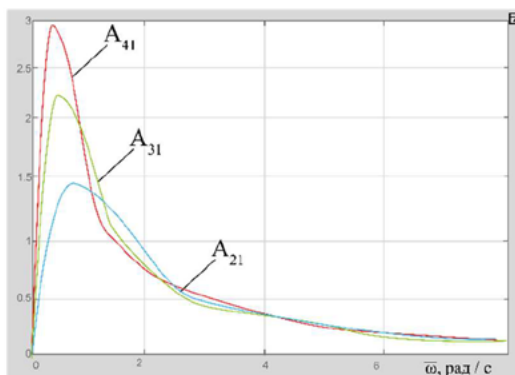


Рис.6 Амплітудно-частотні характеристики процесу суміщення фарб по першій поточній базовій мітці

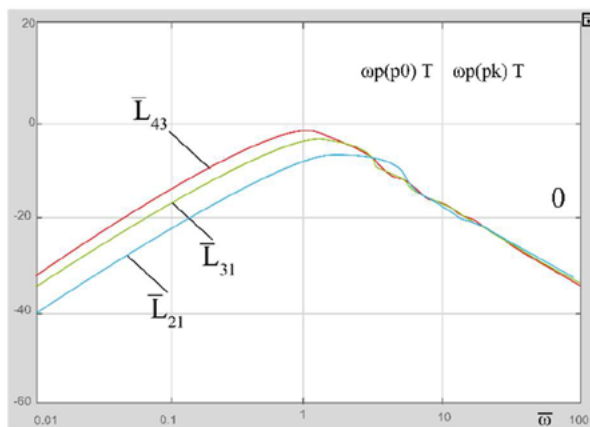


Рис.7 Відносні лінійні амплітудо-частотні характеристики процесу суміщення фарб по поточній базовій мітці

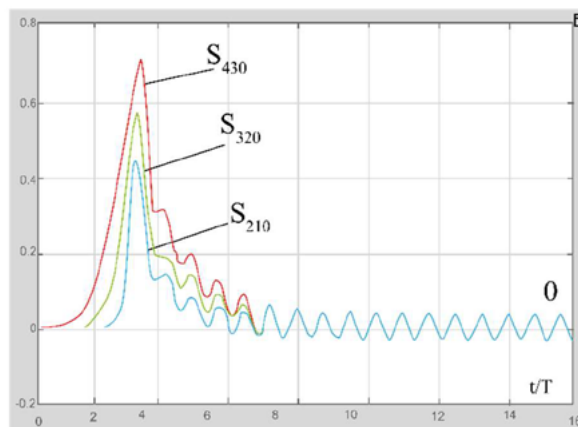


Рис.8 Перехідні характеристики процесу суміщення фарб по першій загальній базовій мітці за наявності гармонійної складової

На рис.5 показані перехідні характеристики процесу суміщення фарб за наявності гармонійної складової, коли похибки суміщення фарб визначаються по першій поточній базовій мітці. Ми бачимо, що на виходах каналів суміщення фарб в даному процесі відбуваються вимушені коливання приблизно однакової амплітуди. Причиною такого результату є обрання за базу виміру мітки першої фарби, у яких відбуваються вимушені коливання з найбільшою амплітудою.

На рис. 6 і 7 представлені АЧХ і відносні лінійні амплітудо-частотні характеристики каналів суміщення фарб по першій поточній базовій мітці.

Дані характеристики показують, що канали суміщення фарб « $\Delta\mathcal{E}_0 \rightarrow s_{21}$ », « $\Delta\mathcal{E}_0 \rightarrow s_{31}$ », « $\Delta\mathcal{E}_0 \rightarrow s_{41}$ » по першій поточній базовій мітці мають властивості смугових фільтрів з відносною частотою фільтрації $\overline{\omega} = 1$. Логарифмічні характеристики мають зміщені відносно один одного низькочастотні складові з нахилом +20дБ/дек і одну загальну високочастотну асимптоту з нахилом — 20дБ/дек. На частоті розмотування рулону при початковому радіусі $\omega_{p0} = V_p^* / \rho_0$ дані характеристики мають значення мінус 18дБ, а при кінцевому радіусі $\omega_{pk} = V_p^* / \rho_k$ - мінус 30дБ. Знаходимо перехідні і частотні характеристики каналів суміщення фарб по першій загальній базовій фарбі. В цьому випадку їх передавальні функції мають вигляд:

$$W_{\Delta\mathcal{E}_0\Delta s_{210}}(p) = W_{\Delta\mathcal{E}_0\Delta s_{21}}(p) \cdot e^{-2Tp}$$

$$W_{\Delta\mathcal{E}_0\Delta s_{310}}(p) = W_{\Delta\mathcal{E}_0\Delta s_{31}}(p) \cdot e^{-Tp}$$

$$W_{\Delta\mathcal{E}_0\Delta s_{410}}(p) = W_{\Delta\mathcal{E}_0\Delta s_{41}}(p)$$

При визначенні похибок суміщення фарб по останній базовій мітці отримуємо наступні передавальні функції каналів вимірювання

$$W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{34}}(p) = -W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{43}}(p) = -k_\varepsilon \frac{1}{(Tp+1)^2} \left(\frac{1-e^{-Tp}}{pT} - \frac{1}{Tp+1} \right)$$

$$\begin{aligned} W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{24}}(p) &= -W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{43}}(p) - W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{23}}(p) \cdot e^{-pT} = \\ &= -k_\varepsilon \frac{1}{(Tp+1)^2} \left(\frac{1-e^{-Tp}}{pT} - \frac{1}{Tp+1} \right) - k_\varepsilon \frac{1}{Tp+1} \left(\frac{1-e^{-Tp}}{pT} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot e^{-Tp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{24}}(p) &= -W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{43}}(p) - W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{23}}(p) \cdot e^{-Tp} - W_{\Delta\mathcal{E}_0s_{21}}(p) \cdot e^{-2Tp} = \\ &= -k_\varepsilon \frac{1}{(Tp+1)^2} \left(\frac{1-e^{-Tp}}{pT} - \frac{1}{Tp+1} \right) - k_\varepsilon \frac{1}{Tp+1} \left(\frac{1-e^{-Tp}}{pT} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot e^{-Tp} - \\ &- k_\varepsilon \left(\frac{1-e^{-Tp}}{pT} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot e^{-2Tp} \end{aligned}$$

На рис. 9 показані перехідні характеристики суміщення фарб по формулі (24) та останній мітці при подачі на вхід першої секції друкарської машини ступінчастого відносного видовження стрічки $\Delta\epsilon_0(t) = \Delta\epsilon_0^*$, амплітуда якого дорівнює його номінальному значенню.

Порівняння цих графіків з перехідними характеристиками по першій загальній базовій мітці показує, що по першій фарбі характеристики суміщення фарб збігаються, а по другій і третій фарбах спосіб визначення похибок суміщення фарб по останній мітці є оптимальним так як величина динамічних відхилень сигналів є меншою $\Delta\bar{s}_{24}(t)$ і $\Delta\bar{s}_{34}(t)$. На рис.10 представлені лінійні амплітудо-частотні характеристики каналів суміщення фарб по останній базовій фарбі.

Отже, $\bar{L}_{pk}(\omega) = L_{pk}(\omega)/k_\epsilon$ - відносна лінійні амплітудо-частотні характеристики каналу суміщення фарб по k-тій базовій мітці (p=1,2,3)

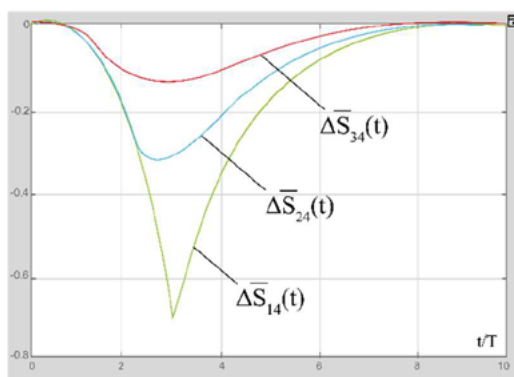


Рис. 9 Перехідні характеристики суміщення фарб по останній базовій мітці при ступінчастій зміні вхідного відносного видовження стрічки на величину ϵ_0^*

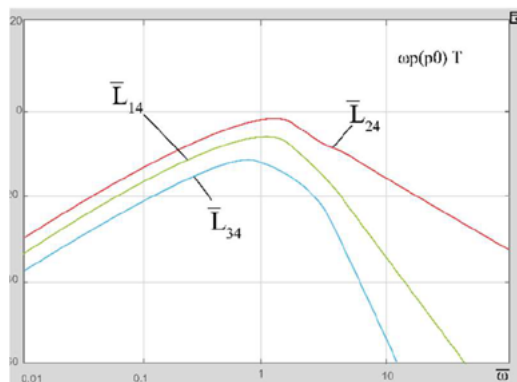


Рис. 10 Відносні лінійні амплітудо-частотні характеристики каналів суміщення фарб по останній базовій фарбі і зміні $\Delta\epsilon_0$

Високочастотні асимптоти даних лінійних амплітудо-частотних характеристик мають різний нахил: - 20 дБ/дек в кривій $L_{14}(\omega)$ -40дБ/дек в кривій $L_{24}(\omega)$ і -60дБ/дек в кривій $L_{34}(\omega)$. Найбільше затухання зовнішньої гармонійної перешкоди забезпечує канал суміщення фарб по 3-ній фарбі. Найгірший режим роботи даного методу виміру розташовується в околиці

відносної частоти $\bar{\omega} = 1$. На цій частоті відповідно забезпечується затушення вхідного гармонійного сигналу на -2,5; -7,7 і -15,5 дБ. Переважніші умови для роботи каналів суміщення фарб мають місце в області низьких частот, наприклад, в діапазоні відносних частот $0,2 < \bar{\omega} < 0,3$.

На рис.11 показані перехідні характеристики суміщення фарб по останній мітці з врахуванням гармонійної складової. Досліджено, що в даному випадку забезпечується зниження вимушених коливань суміщення фарб по другій (процес $\bar{s}_{24}$) і третій (процес $\bar{s}_{34}$) фарбах. Це виходить також з логарифмічних частотних характеристик $L_{24}(\omega)$ і $L_{34}(\omega)$, оскільки їх нахил забезпечує на частоті розмотування рулону додаткове затушення вимушених коливань приблизно в 10 разів (по каналу « $\Delta\mathcal{E}_0 \rightarrow s_{24}$ ») і в 100 разів (по каналу « $\Delta\mathcal{E}_0 \rightarrow s_{34}$ »)

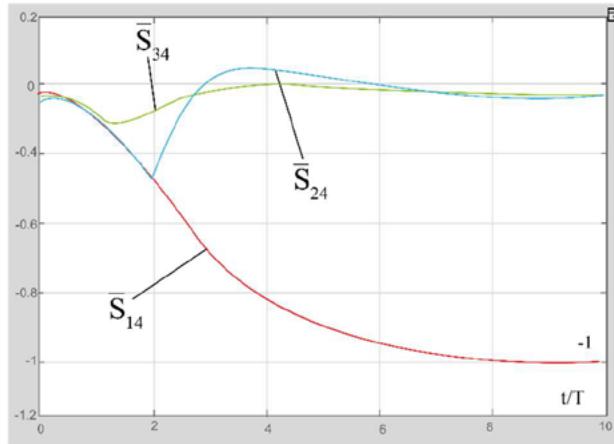


Рис.11 Перехідні характеристики суміщення фарб по останній мітці з врахуванням гармонійної складової

Досліджуємо перехідні характеристики процесу суміщення фарб по останній базовій фарбі при ступінчастій зміні положення першого реєстрового валика $\Delta L_1(t) = \Delta L_1 \cdot l(t)$. В цьому випадку перехідні функції каналів суміщення фарб мають вигляд:

$$W_{\Delta s_{34}\Delta L_1}(p) = -k_\varepsilon \left(\frac{1}{Tp} - \frac{e^{-Tp}}{Tp} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot \frac{k_L p}{(Tp+1)^2}$$

$$W_{\Delta s_{24}\Delta L_1}(p) = W_{\Delta s_{34}\Delta L_1}(p) + W_{\Delta s_{23}\Delta L_1}(p) \cdot e^{-Tp}$$

$$W_{\Delta s_{14}\Delta L_1}(p) = W_{\Delta s_{34}\Delta L_1}(p) - W_{\Delta s_{23}\Delta L_1}(p) \cdot e^{-Tp} - W_{\Delta s_{12}\Delta L_1}(p) \cdot e^{2Tp}$$

де

$$W_{\Delta s_{23}\Delta L_1}(p) = -k_\varepsilon \left(\frac{1}{Tp} - \frac{e^{-Tp}}{Tp} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot \frac{k_L p}{Tp+1}$$

$$W_{\Delta s_{12}\Delta L_1}(p) = \frac{-1}{Tp+1}$$

На рис.12 і 13 представлені графіки перехідних характеристик і лінійні амплітудо-частотні характеристики каналів суміщення фарб по останній базовій мітці і зміні положення першого реєстрового валика ΔL_1 . Видно, що по першій фарбі канал суміщення фарб $\Delta L_1 \rightarrow s_{14}$ має властивості інерційної ланки третього порядку з нахилом високочастотної асимптоти мінус 60 дБ/дек. По другій фарбі канал суміщення фарб $\Delta L_1 \rightarrow s_{24}$ має диференціюючі динамічні властивості з нахилами низькочастотної асимптоти +40 дБ/дек і високочастотної асимптоти мінус 40 дБ/дек, а по третій фарбі канал суміщення фарб $\Delta L_1 \rightarrow s_{34}$ має високочастотну асимптоту мінус 40 дБ/дек.

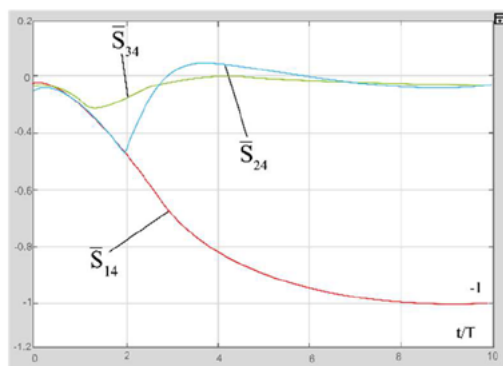


Рис.12. Перехідні характеристики суміщення фарб по останній мітці і при ступінчастій зміні положення першого реєстрового валика ΔL_1

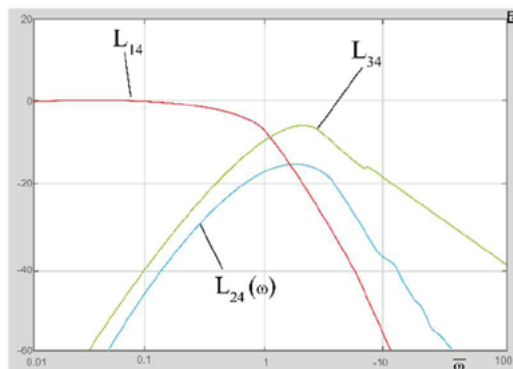


Рис.13. Лінійні амплітудо-частотні характеристики каналів суміщення фарб по останній мітці і при ступінчастій зміні положення першого реєстрового валика ΔL_1

Передавальні функції процесу суміщення фарб по останній базовій фарбі і положенню фази 1-ого формного циліндра мають вигляд:

$$W_{\Delta\varphi_1 s_{34}}(p) = k_\varepsilon \left(\frac{1}{Tp} - \frac{e^{-Tp}}{Tp} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot \frac{k_v k_\phi p}{(Tp+1)^2}$$

$$W_{\Delta\varphi_1 s_{24}}(p) = W_{\Delta\varphi_1 s_{34}}(p) + W_{\Delta\varphi_1 s_{23}}(p) \cdot e^{-Tp}$$

$$W_{\Delta\varphi_1 s_{24}}(p) = W_{\Delta\varphi_1 s_{34}}(p) + W_{\Delta\varphi_1 s_{23}}(p) \cdot e^{-Tp} + W_{\Delta\varphi_1 s_{12}}(p) \cdot e^{-2Tp}$$

$$\text{Де: } W_{\Delta\varphi_1 s_{23}}(p) = k_\varepsilon \left(\frac{1}{Tp} - \frac{e^{-Tp}}{Tp} - \frac{1}{Tp+1} \right) \cdot \frac{k_v k_\phi p}{Tp+1}$$

$$W_{\Delta\varphi_1 s_{12}}(p) = \frac{k_\phi}{Tp+1}$$

На рис.14 і 15 представлені графіки перехідних функцій і лінійні амплітудно-частотні характеристики каналів суміщення фарб по останній базовій мітці і при ступінчастій зміні фази першого формного циліндра $\Delta\varphi_1$.

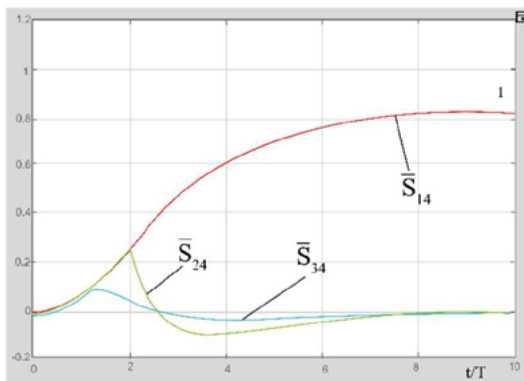


Рис.14. Перехідні характеристики суміщення фарб по останній мітці і при ступінчастій зміні фази першого формного циліндра $\Delta\varphi_1$

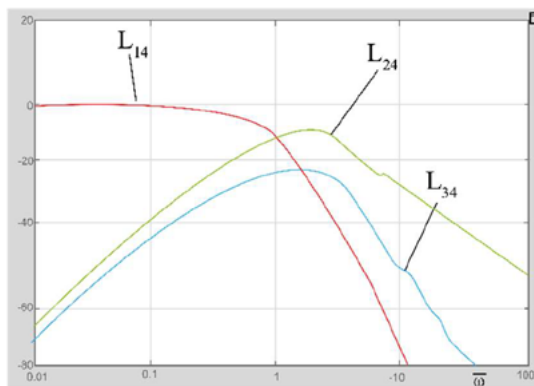


Рис.15. Відносні лінійні амплітудо-частотні характеристики каналів суміщення фарб по останній мітці і при ступінчастій зміні фази першого формного циліндра $\Delta\varphi_1$

Отже, канал першої фарби має динамічні властивості інерційної ланки 3-його порядку, а канали другої і третьої фарб мають диференціюючі властивості з нахилом +40 дБ/дек в області низьких частот і відповідно -20дБ і -40дБ на декаду.

Висновки. Проходження через ланку чистого запізнювання не міняє вигляд амплітудних характеристик, а частотні властивості каналів суміщення фарб по першій загальній базовій мітці будуть такими ж, як в каналів з результатом похибок суміщення фарб по першій базовій поточній мітці.

Найбільші похибки суміщення фарб спостерігаються у момент часу рівний трьом постійним часу T . Загальний час встановлення реакції суміщення фарб складає приблизно $10T$. Вимушені коливання похибок суміщення фарб по всіх секціях однакові. Щодо якості і точності вимірювання спосіб визначення похибок по загальній базовій мітці пріоритетний. Проте вибір першої мітки як базової невдалий, оскільки при цьому амплітуда вимушених коливань суміщення фарб однаково велика по всіх каналах.

Як базову доцільно розглядати останню мітку, оскільки вона друкується практично за відсутності коливань натягу стрічки. В цьому випадку необхідно здійснювати керування фазами формених циліндрів тих, що подають паперову стрічку на регульовані ділянки. Крім того, базова мітка може наноситися всередині машини на другій або третій друкарських секціях. В цьому випадку управління фазами попередніх фарб здійснюється формними циліндрами, що подають стрічку, а керування фазами подальших друкарських секцій здійснюється вивідними формними циліндрами. Це необхідно

враховувати при визначенні знаків дій, для забезпечення оптимального керування.

Важливо враховувати перехідні і частотні характеристики каналів суміщення фарб по останній четвертій базовій фарбі. Досліджено, що в цьому випадку найбільше динамічне відхилення спостерігається по першій фарбі, яке складає 0,68 від базового значення. Максимальні відхилення по другій і третім фарбам складають приблизно 0,5 і 0,25 від найбільшого розходження по першій фарбі. Доведено, що спосіб виміру похибок суміщення фарб по останній фарбі забезпечує ефективнішу фільтрацію високочастотних перешкод.

Список використаних джерел

1. Дурняк Б.В., Тимченко О.В. Математичне моделювання і реалізація систем керування стрічкопровідними системами. Київ: Вид. центр „Просвіта”, 2003. 232 с.
2. Луцків М.М., Хмельницька І.М. Математичне моделювання і комп'ютерне симулювання електромеханічних та стрічкопровідних систем. Львів: Вид-во УАД, 2010. 172 с.
3. Тимченко О., Шевчук О. Математичне моделювання стрічкопровідних систем рулонних ротаційних машин. *Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Глухова*. Київ, 2017. Вип. 80. С. 188-195.
4. Кам'янчин І., Тимченко О., Вовк А., Шевчук О. Аналіз і дослідження системи автоматичного регулювання суміщення фарб. *Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України*. Вип.67. Київ, 2013. С.178-184.
5. Лозинський А.О., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Розв'язання задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB: навчальний посібник. Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2000. 166 с.

References

1. Durniak, B.V., & Tymchenko, O.V. (2003). *Mathematical Modeling and Implementation of Control Systems for Web-Handling Systems*. Kyiv: Prosvita Publishing Center. 232 p.
2. Lutskevych, M.M., & Khmelnytska, I.M. (2010). *Mathematical Modeling and Computer Simulation of Electromechanical and Web-Handling Systems*. Lviv: Publishing House of the Ukrainian Academy of Printing. 172 p.
3. Tymchenko, O., & Shevchuk, O. (2017). Mathematical modeling of web-handling systems of roll-fed rotary printing machines. *Proceedings of the H. Y. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering*, Issue 80, 188–195.

4. Kamyanchyn, I., Tymchenko, O., Vovk, A., & Shevchuk, O. (2013). Analysis and investigation of the automatic color register control system. *Modeling and Information Technologies: Scientific Proceedings of the Institute for Modelling in Energy Engineering of the NAS of Ukraine*, Issue 67, 178–184.
5. Lozynskyi, A.O., Moroz, V.I., & Paranchuk, Ya.S. (2000). *Solving Electromechanical Problems Using MathCAD and MATLAB Software Environments: Study Guide*. Lviv: Lviv Polytechnic National University. 166 p.

DOI 10.32403/2411-9210-2026-1-55-139-158

METHODOLOGY FOR IMPROVING THE QUALITY OF PRINTED PRODUCTS BY OPTIMIZING THE COLOR REGISTRATION PROCESS

O. V. Shevchuk

*Lviv Polytechnic National University,
12 Stepan Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine
oleksii.v.shevchuk@lpnu.ua*

In the modern publishing and printing industry, considerable attention is paid to improving the quality of printed products based on methodologies developed by researchers. One of the key factors in enhancing print quality is the improvement of the color register control process in modern printing presses.

This paper presents a methodology for optimizing the color register process in modern web-fed rotary printing presses. The results of a study of the amplitude characteristics and frequency properties of color register channels based on the first common reference mark and the current reference mark under harmonic variations of paper web tension are presented. Investigations of the transient and frequency characteristics of color registration in a web-fed rotary printing press are also discussed.

It has been proven that passing through a pure time-delay element does not alter the shape of the amplitude characteristics, while the frequency properties of the color register channels based on the first common reference mark are identical to those of the channels determined by color register errors relative to the first current reference mark. From the standpoint of quality and measurement accuracy, the method of determining errors using a common reference mark is preferable. However, selecting the first mark as

the reference is not optimal because the amplitude of the forced color register oscillations remains equally high across all channels. Therefore, it is advisable to use the last mark as the reference mark, since it is printed when web tension fluctuations are practically absent. In this case, control of the plate-cylinder phases supplying the paper web to the regulated sections must be performed. In addition, the reference mark may be applied within the press at the second or third printing unit. In such a case, phase control of the preceding colors is achieved by the plate cylinders feeding the web, whereas phase control of the subsequent printing units is performed by the delivery-side plate cylinders. These factors must be taken into account when determining the control action signs to ensure optimal regulation.

The importance of studying the transient and frequency characteristics of color register channels relative to the last (fourth) reference color is emphasized. It is shown that, in this case, the largest dynamic deviation is observed for the first color, amounting to 0.68 of the reference value. The maximum deviations for the second and third colors are approximately 0.5 and 0.25, respectively, of the largest deviation observed for the first color. It has been demonstrated that the method of measuring color register errors relative to the last color provides more effective filtering of high-frequency disturbances.

Keywords: *web-fed rotary press, web handling system, automatic color register control system, color register characteristics*

Стаття надійшла до редакції 17.03.2026.

Received 17.03.2026.