

2. Гергель В.П., Линёв А.В. Проблемы и перспективы достижения экзафлопного уровня производительности суперкомпьютерных систем / Информационные технологии Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2012, № 3 (1), С. 189-198.
3. Tumeo A., Secchi S., Villa O. Designing Next-Generation Massively Multithreaded Architectures for Irregular Applications. IEEE Computer, August 2012.
4. Таненбаум Э., Остин Т. Архитектура компьютера. 6-е изд. - СПб.: Питер, 2013. – 816 с.
5. Sterling T. Architecture Paths to Exaflops Computing. Is Multicore the next Moor's Law? What about Memory? Invited Presentation to the DOE E3SGS Town Hall Meeting, April 18, 2007.
6. Ferreira da Silva R., Callaghan S., Deelman E. On the use of burst buffers for accelerating data-intensive scientific workflows // Proceedings of the 12th Workshop on Workflows in Support of Large-Scale Science, WORKS '17. ACM, 2017. P. 2:1–2:9.
7. Сигарев А.А. Методология упразднения межпроцессорного обмена в МВС со множественным потоком команд. // Информационные технологии. № 7 / 2009.
8. Сигарев А.А., Душеба В.В. Способ упразднения межпроцессорного обмена в макроконвейерах // Электрон. моделирование. – 2006. – Т.28, № 6. – С. 71 – 89.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3859693>

Поступила 3.10.2019р.

УДК681. 625.23:004.942

М.І. Верхола, д.т.н., проф., Українська академія друкарства, м. Львів
М.І. Калитка, ст.викладач, Українська академія друкарства, м. Львів

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА РОЗПОДІЛ ОБ'ЄМІВ ПОТОКІВ ФАРБИ У ФАРБОДРУКАРСЬКІЙ СИСТЕМІ ПОСЛІДОВНО-ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Abstract. To perform this study, a mathematical model was developed and a signal graph and a color printing system simulator were built. With the help of simulation modeling the nature of the influence of changing the parameters of the printing form and ink on the process of ink transfer and filling during printing of the ink printing system with ink is established. The need to determine the amount of ink that accumulates in the system is justified, as it affects both the parameters of the input task and the amount of ink consumption for the manufacture of printed products.

Постановка проблеми. Фарбодрукарські системи офсетних машин повинні забезпечувати нанесення рівномірного шару фарби заданої товщини на друкувальні елементи фарби і передачу його через офсетний циліндр на матеріал, що задруковується. Для вирівнювання товщини фарби в

© М.І. Верхола, М.І. Калитка 225

поперечному напрямі відбитків використовують розтиральні циліндри, які крім колового руху мають ще й осьове зворотно-поступальне переміщення. Окрім цього на фарбодрукарську систему діють інші технологічні збурення та мікроклімат виробничого переміщення, які впливають на процес розподілу передачі фарби.

Якість поліграфічної продукції безпосередньо залежить від передачі фарбодрукарською системою технологічно необхідної товщини фарби на поверхню відбитків. Для підвищення точності таких систем та визначення фарби на друкування накладу потрібна достовірна інформація про вплив усіх вище зазначених факторів на процес фарбопередачі. Експериментальним шляхом вирішити дану проблему неможливо через інтегральний вплив цих збурень. Тому розроблення математичних моделей, які б адекватно описували процес фарбопередачі з можливістю врахування зміни технологічних параметрів та збурень, що виникають під час друкування є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рух фарби від входу фарбодрукарської системи до виходу супроводжується її коловим та осьовим переміщенням при обертанні валиків та розтиральних циліндрів. При цьому в місцях контакту елементів фарбодрукарської системи фарба розщеплюється, утворюючи зворотні потоки. В працях [1, 2] розглядаються послідовні фарбодрукарські системи з постійною подачею фарби. Розроблено математичні моделі процесу передачі фарби та проведено дослідження розподілу товщини потоків лише між входом та виходом фарбодрукарських систем. Але ці моделі не враховують дискретну подачу фарби фарбоживильним пристроєм. В роботі [3] запропонована математична модель фарбодрукарської системи з трьома накочувальними валиками, яка уже враховує режим роботи фарбоживильного пристрою. Проте представлено результати дослідження перерозподілу товщини потоків фарби тільки між входом і виходом фарбодрукарської системи.

В статті [4] розроблено математичну модель та симулятор фарбодрукарської системи з розтиральним циліндром, що дають можливість визначити середнє значення товщин потоків фарби, в j -тих зонах, що передаються на відбитки та повертаються у дукторну скриньку. В результаті моделювання встановлено, що зменшення коефіцієнта заповнення форми друкувальними елементами призводить до збільшення зворотнього потоку фарби. В результаті моделювання процесу розкочування та передачі фарби у фарбодрукарських системах [5] виявлено, що розподіл фарбових потоків залежить від топології фарбодрукарської системи та коефіцієнтів передачі фарби.

В результаті аналізу отриманих результатів встановлено зі зміною коефіцієнтів передачі фарби відбувається перерозподіл фарбового потоку: при зменшенні коефіцієнта $\alpha < 0,5$ фарба накопичується на перших валиках, а при $\alpha \geq 0,6$ спостерігається вирівнювання товщин фарбового потоку на усіх елементах фарбодрукарської системи.

В публікації [6] представлена математична модель фарбодрукарської системи малоформатної офсетної машини, яка дає можливість досліджувати

процес розподілу й передачі фарби та визначати товщини потоків фарби на поверхні валиків і циліндрів. Але в даній роботі не подано результатів таких досліджень.

Усі вище наведені публікації присвячені дослідженню впливу певних технологічних параметрів лише на розподіл товщини потоків фарби у фарбодрукарських системах базуються за виключенням роботи [6] лише на спрощених моделях таких систем. Окрім того, слід зазначити, що в результаті огляду і аналізу наукових публікацій в міжнародних виданнях не вдалося отримати інформації про дослідження розподілу об'ємів потоків фарби у фарбодрукарських системах.

Тому дослідження характерну розподілу фарбових потоків та визначення об'єму фарби, що наповнює фарбодрукарську систему під час друкування при виході її на усталений режим має як науковий, так і практичний інтерес.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для демонстрації вирішення поставленого завдання використовуємо фарбодрукарську систему послідовно-паралельної структури, схема якої представлена на рис. 1. Товщини зональної подачі фарби задаються відповідними регульовальними органами (РО), які діють на дукторний ніж (ДН). Під час обертання дукторного циліндра фарба виводиться на його поверхню.

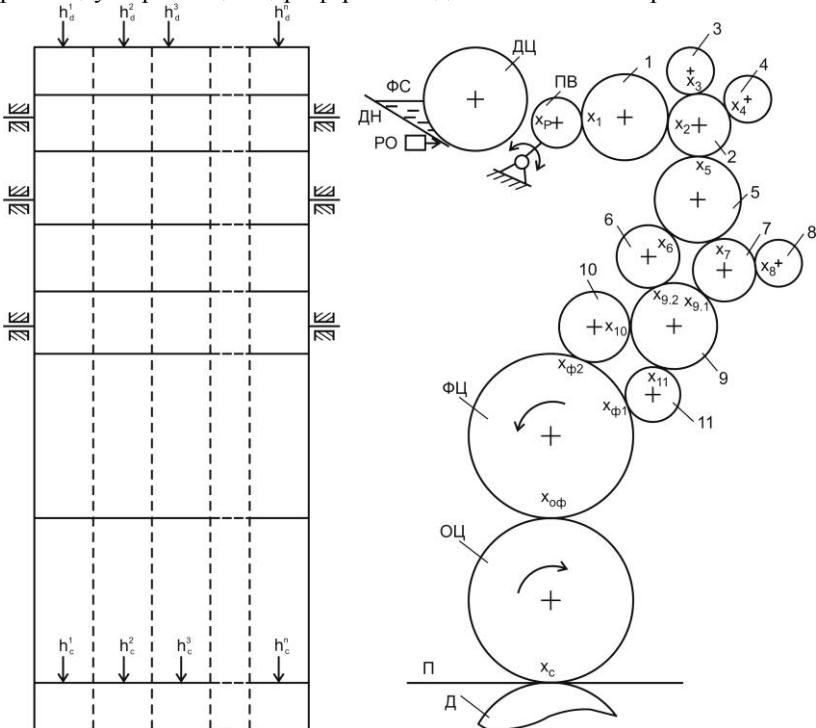


Рис.1 Схема фарбодрукарської системи

Частина фарби забирається з поверхні дуктора передавальним валіком (ПВ) і передається до першого елемента фарбодрукарської системи, яким є розтиральний циліндр. Передавальний валік здійснює циклічний коливальний рух між дуктором та розтиральним циліндром, передаючи фарбу як в прямому, так і зворотньому напрямках. Потоки фарби транспортуються системою валіків і циліндрів (1-11) від входу до друкарської форми в процесі чого сумуються при входженні в місця контакту і розщеплюються при виході з них. Одночасно з передачею фарби в коловому напрямі під дією розтиральних циліндрів потоки фарби переміщуються ще й в осьовому напрямі. Накочувальні валики (10,11) наносять фарбу на друкувальні елементи форми закріпленої на формному циліндрі (ФЦ). З поверхні друкарської форми фарба за допомогою офсетного циліндра (ОЦ) передається на папір (П), який переміщається між офсетним та друкарським циліндрами (Д).

На підставі праць [7, 8] та схеми фарбодрукарської системи (рис. 1) будуємо сигнальний граф, який зображено на рис. 2. Вузли на вході графа відображають поперечні перерізи потоків зональної подачі фарби та її повернення у дукторну скриньку. Вихідні вузли відображають поперечні перерізи потоків фарби, яка передається у відповідні зони відбитків. Всі інші вузли графа відповідають поперечним перерізам потоків фарби в межах j -тих зон контакту елементів фарбодрукарської системи. Відрізки, що з'єднують вузли графа в межах кожної зони відповідають операторам передачі прямих і зворотних потоків фарби в коловому напрямі.

Вітки графа, які з'єднують між собою вузли сусідніх зон відображають оператори передачі прямих і зворотних потоків фарби в осьовому напрямі.

Основними компонентами фарбодрукарської системи, які потрібно математично описувати при розробленні моделі є місця контакту елементів системи, фарбонесучі поверхні валіків і циліндрів. З останнього елемента фарбодрукарської системи, тобто з офсетного циліндра частина фарби передається на папір або інший матеріал, що задруковується, а інша частина залишається на офсетному циліндрі, створюючи зворотній потік.

Для розроблення математичної моделі приймаємо наступні допущення: розглядаємо роботу фарбодрукарської системи в динаміці; система умовно розділена від входу до виходу на зони; кількість зон відповідає кількості регульовальних органів подання фарби; ширини зон рівні між собою; регульованими вхідними величинами є товщини фарби в j -тих зонах поверхні друкованих відбитків, а вхідними – подача фарби у відповідні зони; діаметри валіків і циліндрів є різними; довжини кіл валіків і циліндрів розділені на ціле число умовних одиниць, враховується час переміщення між місцями контакту валіків і циліндрів; часом проходження фарби через зони контакту нехтуємо; час проходження прямих і зворотних потоків фарби поверхнею елементів фарбодрукарської системи шляху довжиною в одну умовну одиницю відповідає одній відносній одиниці; лінійні швидкості поверхонь валіків і циліндрів рівні між собою; період переміщення розтиральних циліндрів відповідає тривалості одного оберта формного циліндра; за змінні

приймаємо поперечні перерізи потоків фарби на поверхнях елементів фарбодрукарської системи, та товщини і поперечні перерізи потоків подачі фарби на вході і відбору на виході, а також поперечні перерізи потоків фарби в місцях контакту елементів фарбодрукарської системи.

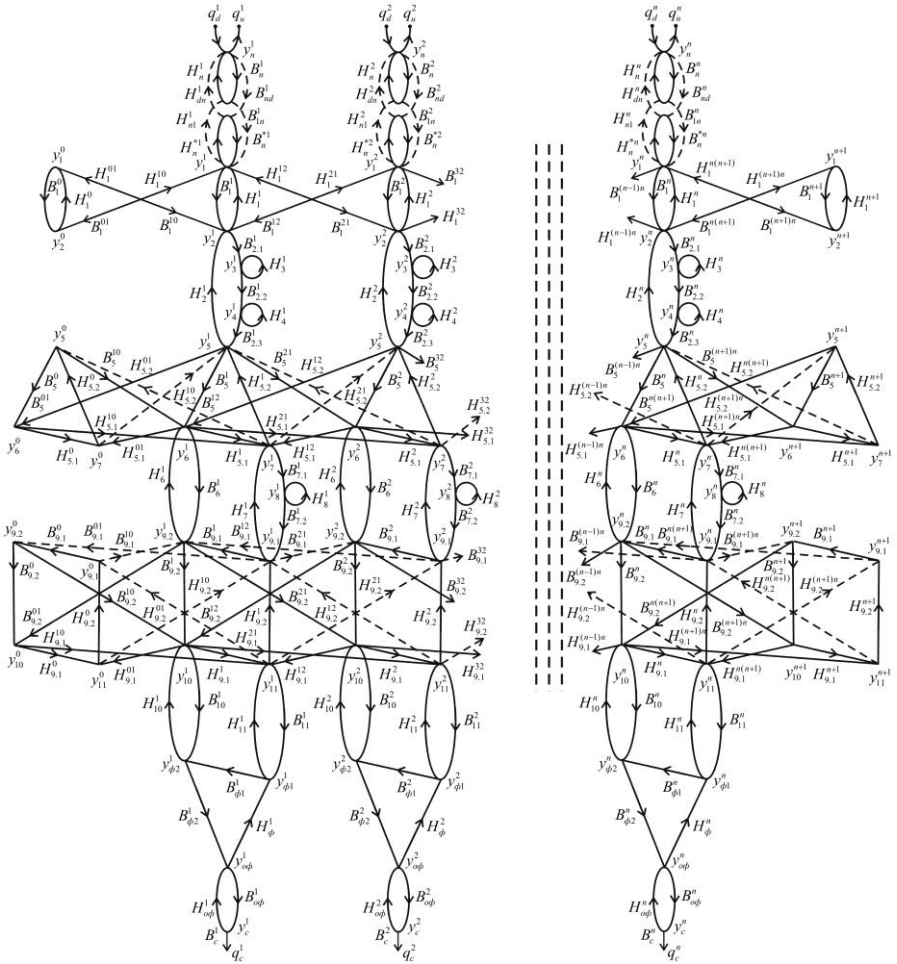


Рис.2 Сигнальний граф фарбодрукарської системи послідовно-паралельної структури

Використовуючи результати досліджень та сигнальний граф (рис. 2) складаємо систему рівнянь, яка описує циркулювання потоків фарби у фарбодрукарській системі послідовно-паралельної структури.

Для j -тої зони:

$$y_n^j(z) = B_d^j(z)s_d^j(z) + H_n^j(z)P_g^j(z)B_n^j(z)y_n^j(z) + [H_n^j(z)H_{n1}^j(z) + H_{dn}^j(z)H_n^{*j}(z)]y_1^j(z);$$

$$s_d^j(z) = b_3^j(z)H_d^j(z);$$

$$s_H^j(z) = H_d^j(z)B_d^j(z)y_n^j(z);$$

$$s_{pn}^j(z) = [B_{1n}^j(z)H_n^j(z) + B_n^{*j}(z)B_{nd}^j(z)]y_n^j(z) + B_n^{*j}(z)P_p^j(z)H_n^{*j}(z)y_1^j(z);$$

$$y_1^j(z) = [B_{1n}^j(z)B_n^j(z) + B_n^{*j}(z)B_{nd}^j(z)]y_n^j(z) + B_n^{*j}(z)P_p^j(z)H_n^{*j}(z)y_1^j(z) + H_1^j(z)y_2^j(z) + H_1^{j(j-1)}(z)y_2^{j-1}(z) + H_1^{j(j+1)}(z)y_2^{j+1}(z);$$

$$s_{p1}^j(z) = [P_p^j(z)\alpha_1^j(z) + \bar{P}_p^j(z)y_1^j(z)];$$

$$s_{rn}^j(z) = H_n^j(z)P_g^j(z)B_n^j(z)y_n^j(z) + [H_n^j(z)H_{n1}^j(z) + H_{dn}^j(z)H_n^{*j}(z)]y_1^j(z);$$

$$y_2^j(z) = B_1^j(z)y_1^j(z) + B_1^{j(j-1)}(z)y_1^{j-1}(z) + B_1^{j(j+1)}(z)y_1^{j+1}(z) + H_2^j(z)y_5^j(z);$$

$$s_{p2.1}^j(z) = B_{2.1}^j(z)y_2^j(z); \quad s_{r1}^j(z) = H_1^j(z)y_2^j(z);$$

$$y_3^j(z) = B_{2.1}^j(z)y_2^j(z) + H_3^j(z)y_3^j(z);$$

$$s_{p2.2}^j(z) = B_{2.2}^j(z)y_3^j(z); \quad s_{r3}^j(z) = H_3^j(z)y_3^j(z);$$

$$y_4^j(z) = B_{2.2}^j(z)y_3^j(z) + H_4^j(z)y_4^j(z);$$

$$s_{p2.3}^j(z) = B_{2.3}^j(z)y_3^j(z); \quad s_{r4}^j(z) = H_4^j(z)y_4^j(z);$$

$$y_5^j(z) = B_{2.3}^j(z)y_4^j(z) + H_{5.2}^j(z)y_7^j(z) + H_{5.2}^{j(j-1)}(z)y_7^{j-1}(z) + H_{5.2}^{j(j+1)}(z)y_7^{j+1}(z);$$

$$s_{p5.1}^j(z) = B_{5.1}^j(z)y_5^j(z); \quad s_{r2}^j(z) = H_2^j(z)y_5^j(z);$$

$$y_6^j(z) = B_5^j(z)y_5^j(z) + B_5^{j(j-1)}(z)y_5^{j-1}(z) + B_5^{j(j+1)}(z)y_5^{j+1}(z) + H_6^j(z)y_{9.2}^j(z);$$

$$s_{p5.2}^j(z) = B_{5.2}^j(z)y_5^j(z); \quad s_{p6}^j(z) = B_6^j(z)y_6^j(z);$$

$$y_7^j(z) = H_{5.1}^j(z)y_6^j(z) + H_{5.1}^{j(j-1)}(z)y_6^{j-1}(z) + H_{5.1}^{j(j+1)}(z)y_6^{j+1}(z) + H_7^j(z)y_{9.1}^j(z);$$

$$s_{p7.1}^j(z) = B_{7.1}^j(z)y_7^j(z); \quad s_{r5}^j(z) = H_{5.2}^j(z)y_7^j(z);$$

$$y_8^j(z) = B_{7.1}^j(z)y_7^j(z) + H_8^j(z)y_8^j(z);$$

$$s_{p7.2}^j(z) = B_{7.2}^j(z)y_8^j(z); \quad s_{r8}^j(z) = H_8^j(z)y_8^j(z);$$

$$y_{9.1}^j(z) = B_{7.2}^j(z)y_8^j(z) + H_{9.2}^j(z)y_{11}^j(z) + H_{9.2}^{j(j-1)}(z)y_{11}^{j-1}(z) + H_{9.2}^{j(j+1)}(z)y_{11}^{j+1}(z);$$

$$s_{p9.1}^j(z) = B_{9.1}^j(z)y_{9.1}^j(z); \quad s_{r7}^j(z) = H_7^j(z)y_{9.1}^j(z);$$

$$y_{9.2}^j(z) = B_6^j(z)y_6^j(z) + B_{9.1}^j(z)y_{9.1}^j(z) + B_{9.1}^{j(j-1)}(z)y_{9.1}^{j-1}(z) + B(z)y_{9.1}^{j+1}(z)y_{9.1}^{j+1}(z);$$

$$\begin{aligned}
s_{p9,2}^j(z) &= B_{9,2}^j(z)y_{9,2}^j(z); & s_{r6}^j(z) &= H_6^j(z)y_{9,2}^j(z); \\
y_{10}^j(z) &= B_{9,2}^j(z)y_{9,2}^j(z) + B_{9,2}^{j(j-1)}(z)y_{9,2}^{j-1}(z) + B_{9,2}^{j(j+1)}(z)y_{9,2}^{j+1}(z) \\
&\quad + H_{10}^j(z)y_{\phi_2}^j(z); \\
s_{p10}^j(z) &= B_{10}^j(z)y_{10}^j(z); & s_{r9,1}^j(z) &= H_{9,1}^j(z)y_{10}^j(z); \\
y_{11}^j(z) &= H_{9,1}^j(z)y_{10}^j(z) + H_{9,1}^{j(j-1)}(z)y_{10}^{j-1}(z) + H_{9,1}^{j(j+1)}(z)y_{10}^{j+1}(z) \\
&\quad + H_{11}^j(z)y_{\phi_1}^j(z); \\
s_{p11}^j(z) &= B_{11}^j(z)y_{11}^j(z); & s_{r9,2}^j(z) &= H_{9,2}^j(z)y_{11}^j(z); \\
y_{\phi_1}^j(z) &= B_{11}^j(z)y_{11}^j(z) + H_{\phi}^j(z)y_{o\phi}^j(z); \\
s_{p\phi_1}^j(z) &= B_{\phi_1}^j(z)y_{\phi_1}^j(z); & s_{r11}^j(z) &= H_{11}^j(z)y_{\phi_1}^j(z); \\
y_{\phi_2}^j(z) &= B_{\phi_1}^j(z)y_{\phi_1}^j(z) + B_{10}^j(z)y_{10}^j(z); \\
s_{p\phi_2}^j(z) &= B_{\phi_2}^j(z)y_{\phi_2}^j(z); & s_{r10}^j(z) &= H_{10}^j(z)y_{\phi_2}^j(z); \\
y_{o\phi}^j(z) &= B_{\phi_2}^j(z)y_{\phi_2}^j(z) + H_{o\phi}^j(z)y_c^j(z); \\
s_{p o\phi}^j(z) &= B_{o\phi}^j(z)y_{o\phi}^j(z); & s_{r\phi}^j(z) &= H_{\phi}^j(z)y_{o\phi}^j(z); \\
y_c^j(z) &= B_{o\phi}^j(z)y_{o\phi}^j(z); & s_{r o\phi}^j(z) &= H_{o\phi}^j(z)y_c^j(z); \\
s_c^j(z) &= B_c^j(z)y_c^j(z); & h_c^j(z) &= (1/V_3) s_c^j(z), \tag{1}
\end{aligned}$$

де $y_n^j(z)$ – z – зображення площі поперечного перерізу потоку фарби в j -тій зоні контакту передавального валіка з дукторним циліндром; $B_d^j(z)$, $H_d^j(z)$ – оператори передачі об'ємів прямого та зворотнього потоків фарби в j -тій зоні дукторного циліндра, j – кількість зон регулювання подачі фарби; $P_g^j(z)$, $P_p^j(z)$ – оператори формування передачі фарби під час спільного руху передавального валіка з дуктором та першим розтиральним циліндром; $B_n^j(z)$, $H_n^j(z)$ – оператори передачі об'ємів прямих і зворотних потоків фарби передавальним валіком під час контакту з дукторним циліндром, $B_n^{*j}(z)$, $H_n^{*j}(z)$ – оператори передачі потоків фарби під час контакту передавального валіка з першим розтиральним циліндром; $B_{nd}^j(z)$, $B_{1n}^j(z)$ – оператори передачі об'ємів фарби передавальним валіком від дуктора до першого розтирального циліндра. $H_{n1}^j(z)$, $H_{nd}^j(z)$ – оператори передачі об'ємів фарби від розтирального до дукторного циліндра; $y_{\phi_1}^j(z)$, $y_{\phi_2}^j(z)$ – z – зображення площ поперечних перерізів потоків фарби в місцях контакту форми з накочувальними валіками; $y_{o\phi}^j(z)$, $y_c^j(z)$ – z -зображення площ поперечних перерізів фарби в j -тих зонах контакту офсетного циліндра з формою та папером; $y_i^j(z)$ – z -зображення площ поперечних перерізів потоків фарби в

місцях контакту елементів фарбодрукарської системи; $V_i^j(z)$, $H_i^j(z)$ – оператори передачі об’ємів прямих та зворотних потоків фарби поверхнями валиків і циліндрів в j -тих зонах фарбодрукарської системи; $V_{\phi 1}^j(z)$, $V_{\phi 2}^j(z)$ – оператори передачі об’ємів фарби друкарською формою; $V_{oc}^j(z)$, $H_{oc}^j(z)$ – оператори передачі об’ємів прямих і зворотних потоків фарби офсетним циліндром; $V_i^{j(j-1)}(z)$, $H_i^{j(j-1)}(z)$ – оператори передачі об’ємів прямих і зворотних потоків фарби при русі розтиральних циліндрів вправо; $V_i^{j(j+1)}(z)$, $H_i^{j(j+1)}(z)$ – оператори передачі об’ємів прямих і зворотних потоків фарби при русі розтиральних циліндрів вліво. V_c^j – оператор передачі об’ємів фарби в j -тій зоні поверхні відбитків; $s_d^j(z)$, $s_c^j(z)$ – z -зображення площ поперечних перерізів потоків фарби, що подаються на вхід фарбодрукарської системи та передають на відбитки; $s_H^j(z)$ – z -зображення площі поперечного перерізу потоку фарби, що повертаються у дукторну скриньку. $s_{pn}^j(z)$, $s_{rn}^j(z)$ – z -зображення площ поперечних перерізів прямих і зворотних потоків фарби в j -тих зонах поверхні передавального валика; $s_{pi}^j(z)$, $s_{ri}^j(z)$ – z -зображення площ поперечних перерізів прямих і зворотних потоків фарби, що передаються у коловому напрямі j -тими зонами поверхонь валиків і циліндрів; $s_{p\phi i}^j(z)$, $s_{r\phi}^j(z)$ – z -зображення площі поперечних перерізів прямих і зворотних потоків фарби модульованих друкарською формою, що передаються j -тими зонами її поверхні; $s_{pof}^j(z)$, $s_{rof}^j(z)$ – z -зображення площ поперечних перерізів прямих і зворотних потоків фарби, що передаються j -тими зонами поверхні офсетного циліндра.

На підставі праць [9, 10, 11] оператори передачі товщин прямих і зворотних потоків фарби поверхнями валиків і циліндрів можна подати так:

$$P_i^j(z) = \frac{h_i^j(z)}{x_i^j(z)} = \alpha_i z^{-p_i}; \quad (2)$$

$$R_i^j(z) = \frac{l_i^j(z)}{x_{i+1}^j(z)} = \gamma_i z^{-r_i} \quad (3)$$

де $x_i^j(z)$ – z – зображення товщини потоків фарби в місцях контакту елементів фарбодрукарської системи $h_i^j(z)$, $l_i^j(z)$ – z – зображення товщин прямих і зворотних потоків фарби на поверхнях елементів фарбодрукарської системи, α_i , γ_i – коефіцієнти передачі прямих і зворотних потоків із зон контакту на поверхню валиків і циліндрів; z^{p_i} ; z^{r_i} – транспортні запізнення при переміщенні прямих і зворотних потоків фарби між місцями контакту елементів фарбодрукарської системи. Для отримання операторів передачі об’ємів потоків фарби потрібно враховувати ширини зон подачі, які за умовою прийнятих допущень рівні між собою і становлять, наприклад, (b) мм або в умовних одиницях.

Домноживши ліві частини рівнянь (2) і (3) на ширину зони подачі фарби (b) отримаємо:

$$B_i^j(z) = \frac{h_i^j(z)b}{x_i^j(z)b} = \frac{s_{pi}^j(z)}{y_i^j(z)} = (\alpha_i z^{-pi}) \frac{b}{b} = \alpha_i z^{-pi}; \quad (4)$$

$$H_i^j(z) = \frac{l_i^j(z)b}{x_{i+1}^j(z)b} = \frac{s_{ri}^j(z)}{y_{i+1}^j(z)} = (\gamma_i z^{-ri}) \frac{b}{b} = \gamma_i z^{-ri} \quad (5)$$

З порівняльного аналізу рівнянь (2), (3) та (4), (5) можна зробити висновок, що оператори передачі товщин та об'ємів потоків фарби мають однаковий математичний опис, тому оператори, які використовуються для математичного відображення передачі товщин потоків фарби можна використовувати для розроблення моделей циркулювання об'ємів потоків фарби у фарбодрукарських системах.

На основі математичної моделі (1) та сигнального графа розроблено симулятор фарбодрукарської системи в середовищі Matlab-Simulink. Для побудови структурної схеми симулятора деталізуємо оператори передачі фарби елементами фарбодрукарської системи. На основі вище викладеного та враховуючи результати роботи [12] оператори передачі фарби фарбоживильним пристроєм в z – зображеннях матимуть такий вигляд:

$$\begin{aligned} B_d^j(z) &= P_g(z) z^{-pa}; B_n^j(z) = [P_g(z)\alpha_n + \bar{P}g(z)]z^{-pn}; B_n^{*j}(z) = P_p(z)z^{-pn}; \\ H_d^j(z) &= P_g(z) \gamma_d z^{-pa}; H_n^j(z) = P_g(z)z^{-rn}; H_n^{*j}(z) = P_g(z)\gamma_l P_p(z)z^{-rn}; \\ B_{nd}^j(z) &= z^{-rn} \cdot \bar{P}g(z)z^{-pa}; B_{1n}^j(z) = \bar{P}g(z)z^{-p1d}; P_g(z) = (1 - z^{-bn})/(1 - z^{-d\phi}); \\ H_{dn}^j(z) &= \bar{P}p(z)\bar{z}^{-rd1}; H_{1n}^j(z) = z^{-pn}\bar{P}p(z)\bar{z}^{-rd1}; P_p(z) = (z^{-(bn+p1d)} - \\ & z^{-(d\phi-rd1)})/(1 - z^{-d\phi}). \end{aligned}$$

де z^{-bn} – транспортне запізнення, що відповідає повороту дукторного циліндра на певний кут у відносних одиницях під час загальної подачі фарби; z^{-pa} , z^{-rd} – транспортні запізнення передачі фарби від дукторної скриньки до місця контакту з передавальним валиком і в зворотньому напрямі; z^{-pn} , z^{-rn} – транспортні запізнення передачі прямих і зворотних потоків фарби поверхню передавального валика у відносних одиницях; z^{-p1d} – час вистою передавального валика біля дукторного циліндра в сумі з часом переміщення його до розкочувального валика у відносних одиницях; z^{-rd1} – час переміщення передавального валика від першого розтирального циліндра до дуктора в сумі часом вистою до початку повороту дуктора у відносних одиницях. Оператори передачі прямих і зворотних потоків фарби в коловому напрямі використовуючи результати наукової праці [13] можна подати так:

$$\begin{aligned} B_i^j(z) &= \alpha_i(z)z^{-pi}; H_i^j(z) = \gamma_i z^{-ri}; B_{\phi 1}^j(z) = \alpha_{\phi 1} F(z)z^{-P\phi 1}; B_{\phi 2}^j(z) = \alpha_{\phi 2} F(z)z^{-P\phi 2}; \\ H_{\phi}^j(z) &= \gamma_{\phi}(z)z^{-r\phi}; B_{o\phi}^j(z) = \gamma_{o\phi} z^{-P_{o\phi}}; H_{o\phi}^j(z) = \gamma_{o\phi}(z)z^{-r_{o\phi}}; B_c^j(z) = \beta; \end{aligned} \quad (6)$$

де α_i , $\alpha_{\phi 1}$, $\alpha_{o\phi}$, γ_i , γ_{ϕ} , $\gamma_{o\phi}$, - коефіцієнти розщеплення і передачі прямих та зворотних потоків із зон контакту валиків і циліндрів; $F^j(z)$ – оператор передачі фарби j-тою зоною друкарської форми; β – коефіцієнт передачі фарби з

поверхні офсетного циліндра на матеріал, що задруковується; $z^{-p_i}, z^{-r_i}, z^{-p_\phi}, z^{-p_{o\phi}}, z^{-r_{o\phi}}$ – транспортні запізнення передачі фарби елементами фарбодрукарської системи в коловому напрямі між місцями їх контакту.

Оператори формування розміщення друкувальних елементів в j -тих зонах поверхні форми, спираючись на результати роботи [14] можна представити у такому вигляді:

$$F_i^j(z) = z^{-b_o}(1-z^{-a_1^j+z^{-a_1^j+b_1^j}}-z^{-(a_1^j+b_1^j+a_2^j)}+\dots-z^{-(a_1^j+b_1^j+\dots+b_{m-1}^j+a_n^j)})(1-z^{-d_z})^{-1} \quad (7)$$

де b_o – зміщення початку зображення друкувальних елементів по відношенню до початку форми; a_i^j, b_i^j – транспортне запізнення переміщення фарби на віддаль, що відповідає розмірам друкувальних та пробільних елементів в j -тій зоні друкарської форми.

Математичний опис передачі потоків фарби розтиральними циліндрами в коловому напрямі можна подати таким чином:

$$V_i^j(z) = (\alpha_i - \alpha_{i_{oc.л.}}(z) - \alpha_{i_{oc.п.}}(z)) z^{-p_i}; H_i^j(z) = (\gamma_i - \gamma_{i_{oc.л.}}(z) - \gamma_{i_{oc.п.}}(z)) z^{-r_i}; \quad (8)$$

Коефіцієнти передачі потоків фарби між зонами в осьовому напрямі залежать від геометричних розмірів закону руху розтиральних циліндрів та топології фарбодрукарської системи і їх можна подати як у праці [15]. В даній роботі пропонується більш точно врахувати характер руху розтирального циліндра, який у фарбодрукарських системах офсетних машин здійснюється за синусоїдальним законом. Якщо розтиральний циліндр робить повний цикл за один оберт формного циліндра, то рух будь-якої точки на його поверхні в осьовому напрямі можна подати так:

$$s(t) = \frac{b_{oc.max}}{2} \sin \frac{2\pi}{T_\phi} t, \quad (9)$$

де $b_{oc.max}$ – максимальна величина осьового переміщення розтирального циліндра, T_ϕ – період обертання формного циліндра. При переміщенні прямого потоку фарби, наприклад, поверхнею першого розтирального циліндра від місця його контакту з передаючим валиком до місця контакту з валиком 2 за час T_{p1} потік фарби зміститься в осьовому напрямі на величину $b_{oc}(t)$:

$$b_{oc}(t) = s(t) - s(t - T_{p1}) \quad (10)$$

Оскільки фарба на поверхню розтирального циліндра передається у момент виходу її із місця контакту з передаючим валиком, то в математичній моделі для зручності представлення осьового розподілу фарби віртуально переміщаємо зміщення в осьовому напрямі $b_{oc}(t)$ від місця контакту розтирального циліндра з валиком 2 до місця контакту з передаючим валиком. Тоді рівняння (10) набуде такого вигляду:

$$b_{oc}(t) = s(t+T_{p1}) - s(t) \quad (11)$$

Після підстановки рівняння (9) у рівняння (11) отримаємо:

$$b_{oc}(t) = \frac{b_{oc.max}}{2} \left(\sin \left(\frac{2\pi}{T_\phi} t + T_{p1} \right) - \sin \frac{2\pi}{T_\phi} t \right) \quad (12)$$

Передачу прямих потоків фарби в осьовому напрямі можна описати як добуток коефіцієнта передачі фарби α в коловому напрямі на відношення переміщення розтирального циліндра в осьовому напрямі $b_{oc}(t)$ між двома позиціями його контакту з сусідніми валиками до ширини зони подачі (проходження) фарби b_3 :

$$\alpha_{oc}(t) = \frac{ab_{oc} \max\left(\sin\left(\frac{2\pi}{T_f}t + T_{p1}\right) - \sin\frac{2\pi}{T_f}t\right)}{B_3} \quad (13)$$

Для зручності моделювання вираз (13) перетворимо в операторну форму із застосуванням z -перетворень, для цього здійснюємо заміну $(2\pi/T_f)$ на ω та застосовуємо перетворення Лапласа [16]:

$$L\{\alpha_{oc}(t)\} = \frac{L\left\{\frac{ab_{oc} \max\left(\sin\left(\frac{2\pi}{T_f}t + T_{p5}\right) - \sin\frac{2\pi}{T_f}t\right)\right\}}{L\{B_3\}} \quad (14)$$

Після перетворення отримаємо коефіцієнт передачі фарби в осьовому напрямі в операторній формі:

$$\alpha_{oc}(s) = \frac{ab_{oc} \max}{2B_3} \left(\frac{\omega s}{s^2 + \omega^2} (\cos \omega T_{p5} - 1) + \frac{s^2}{s^2 + \omega^2} \sin \omega T_{p5} \right) \quad (15)$$

Щоб перейти до дискретної форми представлення закону руху розтирального циліндра приймаємо, що $t=nT$ (де T – час, за який точка на поверхні будь-якого елемента фарбодрукарської системи переміститься в коловому напрямку на одну умовну одиницю шляху). Тоді відносний час циклу роботи розтирального циліндра, який дорівнює тривалості одного оберту формного циліндра, становитиме $d_f=T\phi/T$, а відносний час опередження буде $p_l=T_{p1}/T$.

Вивіши додатково фіксатор нульового порядку для запам'ятовування значень окремих відліків, які здійснюються з кроком квантування T та застосовавши z -перетворення [17], отримаємо:

$$\begin{aligned} \alpha_{1oc}(z) &= Z \left\{ \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \alpha_{oc}(s) \right\} = \\ &= \frac{ab_{oc} \max}{2b_3} \frac{z-1}{z} \left(\frac{z \sin \omega T (\cos \omega p_1 - 1)}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1} + \frac{(z^2 - z \cos \omega T) \sin \omega p_1}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Якщо прийняти, що рух розтирального циліндра вправо відповідає додатному значенню синусоїдальної функції, а вліво – від'ємному, то змінні коефіцієнти передачі в осьовому напрямі прямих потоків фарби можна визначити наступним чином:

якщо $\alpha_{1oc}(z) > 0$, тоді $\alpha_{1oc.l}(z) = \alpha_{1oc}(z)$; $\alpha_{1oc.r}(z) = 0$;

якщо $\alpha_{1oc}(z) < 0$, тоді $\alpha_{1oc.l}(z) = 0$; $\alpha_{1oc.r}(z) = \alpha_{1oc}(z)$.

Застосовавши вище викладений метод визначаємо коефіцієнти передачі в осьовому напрямі зворотних потоків фарби:

$$\gamma_{1oc}(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \gamma_{oc}(s) \right\} = \frac{\gamma_{oc} \max}{2\epsilon_3} \frac{z-1}{z} \times$$

$$\times \left(\frac{z \sin \omega T (\cos \omega r_1 - 1)}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1} + \frac{(z^2 - z \cos \omega T) \sin \omega r_1}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1} \right). \quad (17)$$

Виходячи з вище наведеного припущення визначаємо коефіцієнти передачі в осьовому напрямі зворотних потоків фарби:

якщо $\gamma_{10c}(z) > 0$, тоді $\gamma_{10c.n}(z) = \gamma_{10c}(z)$; $\gamma_{10c.l}(z) = 0$;

якщо $\gamma_{10c}(z) < 0$, тоді $\gamma_{10c.n}(z) = 0$; $\gamma_{10c.l}(z) = \gamma_{10c}(z)$.

Математична модель описує роботу фарбодрукарської системи представленої на рис.1, яка є основною частиною фарбодрукарської системи офсетної машини фірми Heidelberg Speedmaster – 102.

На основі математичної моделі (1) і рівнянь (4-17) та сигнального графа (2) з врахуванням геометричних розмірів валиків і циліндрів та використанням операторів передачі фарби будуємо в середовищі Matlab-Simulink симулятор дванадцятизонної фарбодрукарської системи.

Для дослідження процесу розподілу і передачі фарби у фарбодрукарській системі під час друкування розробляємо тестову друкарську форму, яка представлена на рис. 3. На основі файлу з інформацією про форму (рис. 3) визначаємо за допомогою програми “InkUnit” [18] коефіцієнти зонального заповнення форми друкувальними елементами k_3^j .



Рис.3. Зображення друкарської форми

Оскільки розроблена математична модель є двовимірною то параметри друкарської форми в симуляторі можна задати через коефіцієнт заповнення k_3^j , або як у нашому варіанті за допомогою операторів формування друкувальних елементів, які на підставі рівняння (7) можна подати так:

$$F^j(z) = z^{-v_0} (1 - z^{-\alpha_1^j}) (z^{d_f} - 1) \times z^{-d_f}, \quad (18)$$

де d_f тривалість одного оберту формного циліндра у відносних одиницях; $\alpha_1^j = k_3^j d_f$ – транспортні запізнення при перенесенні фарби на друкувальні елементи (плашки) в j -тих зонах форми у відносних одиницях.

Вводимо в симулятор геометричні розміри елементів фарбодрукарської системи як транспортні запізнення передачі потоків фарби їхніми поверхнями; коефіцієнти передачі прямих і зворотних потоків фарби в коловому напрямі $\alpha_i^j = \gamma_i^j = 0,5$; а коефіцієнти передачі фарби на відбитки $\beta^j = 0,7$. Максимальну величину осьового переміщення розтирального циліндра вважаємо рівною ширині зони подачі фарби, а тривалість загальної подачі фарби b_n приймаємо рівною 30 відносних одиниць.

На підставі отриманих коефіцієнтів заповнення форми визначаємо попередні значення товщин зональної подачі фарби. Після введення в симулятор параметрів вхідного завдання проводимо симулювання процесу друкування до виходу фарбодрукарської системи на усталений режим. Корегуємо параметри вхідного завдання виходячи з умови дотримання балансу подачі та відбору фарби та забезпечення товщин фарби у всіх зонах відбитка рівної 1 мкм.

Після тестування таким чином симулятора підключаємо в його структурну схему блоки які визначають об'єми потоків фарби $V_i^j(z)$, що накопичуються в j -тих зонах поверхонь усіх елементів фарбодрукарської системи. Математичний опис їх роботи можна подати в такому вигляді:

$$V_i^j = (z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} + \dots + z^{-p_1})s_{p_i}^j + (z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} + \dots + z^{-r_i})s_{r_i}^j \quad (19)$$

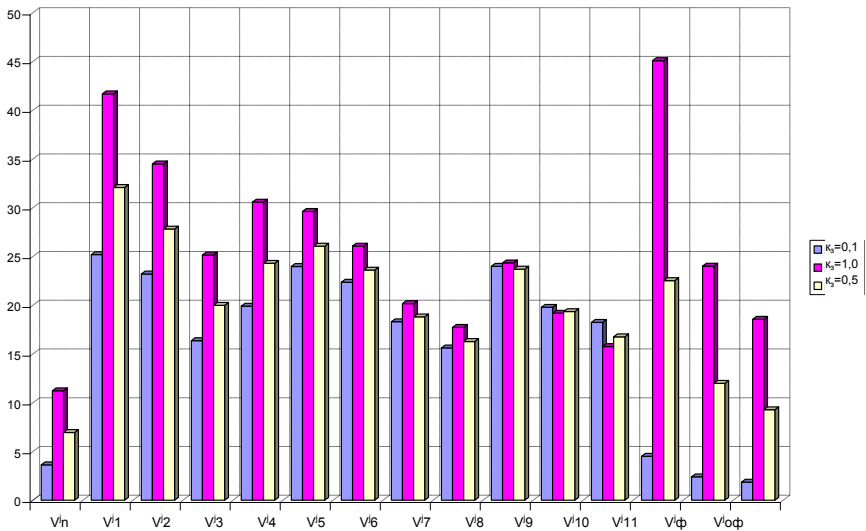
Налаштовуємо симулятор та проводимо моделювання до виходу фарбодрукарської системи на робочий режим. Отримані дані зведено у табл. 1.

В результаті моделювання встановлено, що розподіл об'ємів фарби на поверхні валиків залежить від коефіцієнтів заповнення форми k_3^j , в j -тих зонах відбитка. Так якщо при $k_3=0,1$ об'єм фарби на поверхні першого розтирального циліндра після виходу фарбодрукарської системи на робочий режим становить 25,19 мм³, то об'єм фарби на цьому ж циліндрі у зоні з $k_3=1,0$ буде на 65% більшим. Проте на накочу вальних валиках кількість фарби в зоні з $k_3=1,0$ буде меншою ніж у зоні з $k_3=0,1$ так, якщо на 10 валику об'єм фарби буде меншим лише на 3%, то на 11 валику – меншим уже на 14% (рис. 4). Слід зазначити, що об'єми фарби на поверхні форми і офсетного циліндра прямопропорційно залежить від коефіцієнтів k_3^j у відповідних зонах. Проте зональний розподіл об'ємів потоків фарби у фарбодрукарській системі має зовсім інший характер. Так якщо сума об'ємів фарби на поверхнях валиків і циліндрів від передаючого до накочу вальних валиків у зоні з $k_3=0,1$ становить 230,59 мм³, то ця сума у зоні з $k_3=0,5$ є більшою на 11%, а у зоні з $k_3=1,0$ більшою не у 10 раз, а лише на 28% (рис. 5.а).

Таблиця 1.

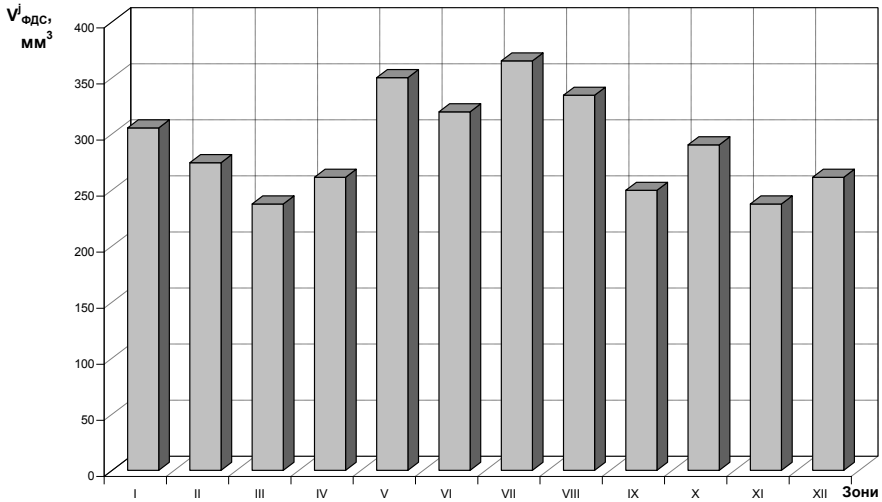
Результати імітаційного моделювання при $\alpha_n = \alpha_i = 0,5$; $\gamma_n = \gamma_i = 0,5$

№ вал.	Об'єм	Зони											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$K_{i,j}^1$		0,6	0,4	0,1	0,3	0,9	0,7	1,0	0,8	0,2	0,5	0,1	0,3
$V_{i,d}^1$		53,24	36,6	11,87	28,34	78,18	61,55	86,5	69,84	20,1	44,9	11,87	28,34
$V_{i,d}^2$		51,110	35,136	11,395	27,206	75,053	59,088	83,040	67,046	19,296	43,104	11,395	27,206
П.	$V_{i,n}^1$	7,808	6,085	3,632	5,259	10,375	8,655	11,232	9,507	4,448	6,948	3,632	5,259
1	$V_{i,1}^1$	34,020	30,080	25,192	28,370	39,770	35,870	41,680	37,770	26,807	32,080	25,192	28,370
2	$V_{i,2}^1$	29,163	26,401	23,209	25,265	33,164	30,435	34,497	31,761	24,265	27,817	23,209	25,265
3	$V_{i,3}^1$	21,030	18,900	16,370	18,000	24,120	22,020	25,150	23,040	17,210	19,990	16,370	18,000
4	$V_{i,4}^1$	25,570	22,980	19,910	21,890	29,330	26,770	30,580	28,010	20,920	24,300	19,910	21,890
5	$V_{i,5}^1$	26,777	25,255	23,976	24,750	28,904	27,419	29,619	28,112	24,394	26,058	23,976	24,750
6	$V_{i,6}^1$	24,107	23,029	22,358	22,738	25,576	24,527	26,064	25,014	22,576	23,603	22,358	22,738
7	$V_{i,7}^1$	19,089	18,464	18,310	18,353	19,906	19,308	20,174	19,572	18,356	18,806	18,310	18,353
8	$V_{i,8}^1$	16,570	15,930	15,620	15,780	17,440	16,820	17,730	17,100	15,720	16,280	15,620	15,780
9	$V_{i,9}^1$	23,851	23,482	23,993	23,558	24,231	23,911	24,347	24,028	23,775	23,706	23,993	23,558
10	$V_{i,10}^1$	19,360	19,260	19,783	19,391	19,259	19,289	19,182	19,248	19,615	19,347	19,783	19,391
11	$V_{i,11}^1$	16,559	16,893	18,238	17,274	15,960	16,297	15,768	16,091	17,783	16,756	18,238	17,274
	$\Sigma V_{i,j}^1$	263,904	246,759	230,591	240,628	288,035	271,321	296,023	279,253	235,869	255,691	230,591	240,628
Ф	$V_{i,\phi}^1$	27,034	18,026	4,509	13,524	40,577	31,561	45,086	36,051	9,023	22,525	4,509	13,524
ОФ	$V_{i,\phi}^2$	14,419	9,600	2,401	7,203	21,602	16,805	24,010	19,193	4,804	11,992	2,401	7,203
	$\Sigma V_{i,\phi} + V_{i,\phi}^2$	41,453	27,626	6,910	20,727	62,179	48,366	69,096	55,244	13,827	34,517	6,910	20,727
	$\Sigma V_{i,d}^1$	305,357	274,385	237,501	261,355	350,214	319,687	365,119	334,497	249,696	290,208	237,501	261,355
	$V_{i,c}^1$	11,136	7,424	1,856	5,561	16,704	12,991	18,560	14,848	3,711	9,280	1,856	5,561

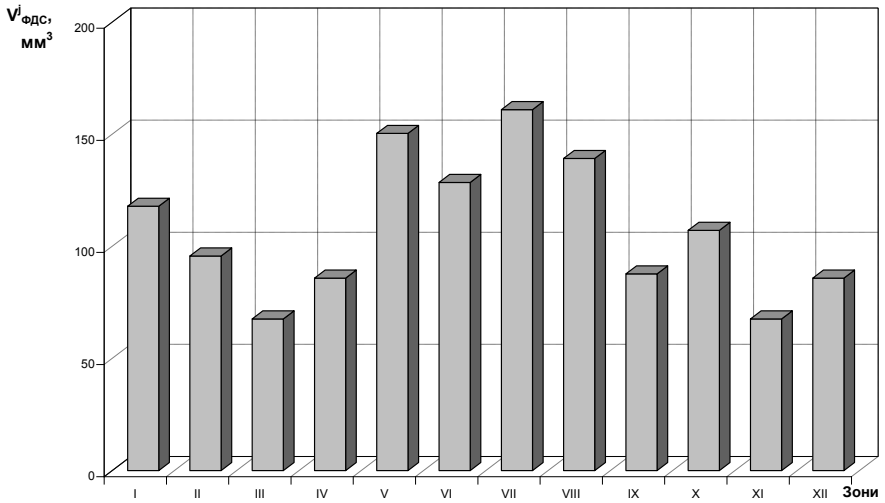
Рис.4. Гістограма розподілу об'ємів фарби на поверхнях елементів фарбодрукарської системи для трьох значень k_3

Отже, для забезпечення процесу друкування відбитків з широким діапазоном κ_3 за умови, що коефіцієнти розщеплення фарби в місцях контакту валиків і циліндрів $\alpha_i=0,5$ в усіх зонах фарбодрукарської системи повинна знаходитися певна технологічно необхідна кількість фарби. Якщо врахувати, ще об'єми фарби які в процесі друкування будуть передаватися друкувальними елементами форми у відповідно поверхнею офсетного циліндра, то зональний розподіл фарби буде дещо іншим. У зоні з $\kappa_3=0,1$ сумарний об'єм фарби становитиме 237,5 мм³, а у зоні з $\kappa_3=1,0$ він буде в 1,54 рази більшим (рис. 5.а).

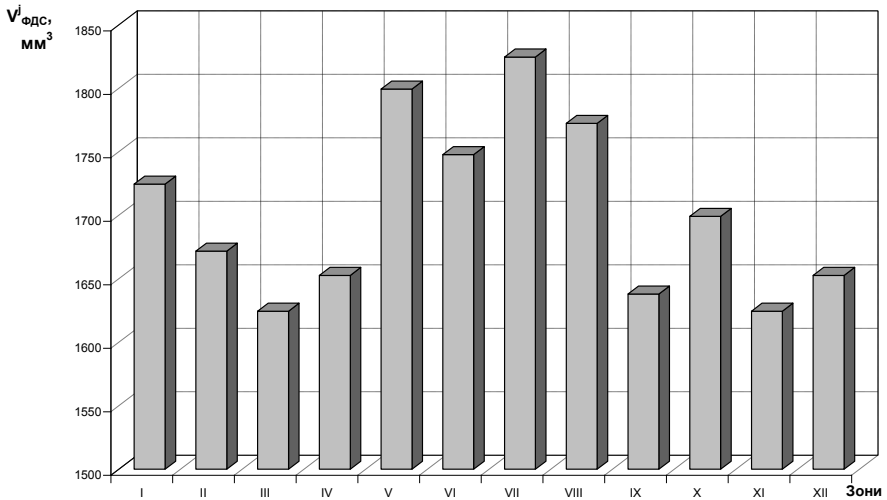
В результаті імітаційного моделювання виявлено суттєвий вплив на кількість фарби яка знаходиться у фарбодрукарській системі та її розподіл коефіцієнтів розщеплення і передачі із місць контакту на поверхню валиків і циліндрів α_i . Так при збільшенні α_i до 0,6 кількість фарби яка знаходиться у фарбодрукарській системі зменшується у 2,8 рази порівняно з варіантом де $\alpha_i=0,5$. Окрім того спостерігається більш виражений зональний розподіл фарби так у зоні з $\kappa_3=1,0$ під час друкування знаходиться 2,4 рази більший об'єм фарби ніж у зоні з $\kappa_3=0,1$ (рис. 5.б). Якщо прийняти, що друкування проводиться за умови, коли $\alpha_i=0,4$, то зональний розподіл потоків фарби має суттєво інший характер. Так у зоні де друкарська форма має максимальну кількість друкувальних елементів ($\kappa_3=1,0$) об'єм фарби буде лише на 12% більший ніж у зоні де $\kappa_3=0,1$ (рис. 5.в), але при цьому загальний об'єм фарби який знаходиться у фарбодрукарській системі збільшується у шість разів порівняно з варіантом коли $\alpha_i=0,5$.



а)



б)



в)

Рис.5. Гістограма зонального розподілу об'ємів потоків фарби у фарбодрукарській системі: а) $\alpha_i=0,5$; б) $\alpha_i=0,6$; в) $\alpha_i=0,4$

В результаті проведеного дослідження встановлено, що зміна таких технологічних параметрів, як щільність заповнення форми друкувальними елементами та величина розщеплення фарби у зонах контакту валиків і циліндрів суттєво впливають на характер розподілу фарби у фарбодрукарській системі та її наповнення фарбою під час друкування.

Висновки. Для дослідження впливу технологічних параметрів на процес фарбопередачі під час друкування застосовано інформаційну технологію. Для її реалізації розроблено математичну модель фарбодрукарської системи, яка враховує топологію системи та описує рух усіх її елементів в тому числі і синусоїдальне переміщення розтиральних циліндрів в осьовому напрямі. На основі математичної моделі і сигнального графа побудовано в середовищі Matlab-Simulink симулятор фарбодрукарської системи. Шляхом імітаційного моделювання проведено дослідження впливу технологічних параметрів на циркулювання і розподіл фарбових потоків, та наповнення фарбодрукарської системи фарбою. Виявлено, що зміна щільності заповнення форми друкувальними елементами впливає лише на зміну об'ємів фарби на поверхні валиків розміщених ближче до входу системи. Встановлено, що значно більший вплив мають параметри фарби, так із зменшенням коефіцієнтів її розщеплення і передачі вона в більшій мірі накопичується на вході фарбодрукарської системи. Окрім того суттєво збільшується загальна кількість фарби у системі так, якщо коефіцієнти передачі фарби зменшити з 0,5 до 0,4 то об'єм фарби у фарбодрукарській системі при виході її на усталений режим збільшиться у 6 разів. Отримані результати обґрунтовують потребу у визначенні об'єму фарби, яка наповнює фарбодрукарську систему під час її роботи, оскільки це впливає, як на параметри вхідного завдання так і величину витрати фарби на виготовлення друкованого замовлення.

1. Луцків М.М. Визначення точності фарбодрукарської системи послідовної структури для заданих інтервалів тоновідтворення зображення / М.М. Луцків, В.М. Рибак // Комп'ютерні технології друкарства : збірник наукових праць. – Львів : УАД. – 2008. – №20. – С. 25–33.
2. Луцків М.М. Розрахунок і побудова номограм розходу та відбору фарби у фарбодрукарських системах послідовної структури / М.М. Луцків, В.І. Рибак // Комп'ютерні технології друкарства : Збірник праць / УАД. – Львів, 2007. – №18. – С. 30-39.
3. Верхола М.І. Визначення коефіцієнта передачі фарби передаючим валиком та аналіз розподілу фарби між входом та виходом фарбової системи з трьома накочувальними валками / М.І. Верхола, В.М. Бабінець. // Комп'ютерні технології друкарства : Збірник наукових праць / УАД. – 2008. – № 20. – С. 3-24.
4. Верхола М.І. Моделювання та комп'ютерне визначення розподілу фарби між входом та виходом фарбової системи в динаміці / М.І. Верхола, І.Б. Гук, Р.М. Споляк // Комп'ютерні технології друкарства : збірник наукових праць. – Львів : УАД. – 2010. – № 24. – С.21–33.
5. Шостачук Ю.О. Дослідження фарбових апаратів офсетних друкарських машин розгалуженого типу / Ю.О. Шостачук, О.П. Шостачук // Технологія і техніка друкарства: Зб. наук. праць ВПІ НТУУ “КПІ” – К.: НТУУ “КПІ” – 2013. – Вип. 1. – С. 76-87.
6. Верхола М.І. Двовимірна модель фарбодрукарської системи з трьома накочувальними валками / М.І. Верхола // Наукові записки / УАД. – 2016. – №1(52). – С. 32-41.

7. *Верхола М.І.* Сигнальний граф процесу розкочування фарби / М.І. Верхола, М.М. Луцків // Вісник ДУ «Львівська політехніка». – Львів, 1998. – Том 2. – С. 348-353.
8. *Верхола М.І.* Розширений сигнальний граф розгалужених фарбових груп / М.І. Верхола, М.М. Луцків // Поліграфія і видавнича справа. – 1999. – №35. – С. 196-200.
9. *Верхола М.І.* Моделювання та аналіз впливу розміщення друкуючих елементів на формі на процес розподілу фарби у фарбових системах / М.І. Верхола, І.Б. Гук, В.М. Бабинець // Комп'ютерні технології друкарства : збірник наукових праць. – Львів : УАД. – 2007. – №18. – С.5–21.
10. *Верхола М.І.* Моделювання та аналіз впливу траєкторії руху розтирочного циліндра на процес розкочування фарби / М.І. Верхола, І.Б. Гук // Комп'ютерні технології друкарства : збірник наукових праць. – Львів : УАД. – 2001. – №6. – С. 337–353.
11. *Верхола М.І.* Моделювання та визначення розподілу фарби в динаміці у фарбових системах з розтиральними циліндрами / М.І. Верхола, І.Б. Гук // Комп'ютерні технології друкарства : збірник наукових праць. – Львів : УАД. – 2006. – № 16. – С. 3-13.
12. *Верхола М.І.* Моделювання та визначення коефіцієнта передачі фарби передавальним валиком у фарбовій системі з розтиральним циліндром / М.І. Верхола, І.Б. Гук // Комп'ютерні технології друкарства : Збірник наукових праць / УАД. – Львів, 2009. – №21. – С.39-52.
13. *Верхола М.І.* Моделювання та аналіз впливу розміщення друкуючих елементів на формі на процес розподілу фарби у фарбових системах / М.І. Верхола, І.Б. Гук, В.М. Бабинець // Комп'ютерні технології друкарства : Збірник наукових праць / УАД. – Львів, 2007. – №18. – С.5-21.
14. *Верхола М.І.* Інформаційна технологія аналізу фарбодрукарської системи з чотирма накочувальними валиками на основі її тривимірної математичної моделі / М.І. Верхола // Поліграфія і видавнича справа : Науково-технічний збірник / УАД. – 2016. – №1(71). – С.39-50.
15. *Верхола М.І.* Моделювання та визначення розподілу фарби в динаміці у фарбових системах з розтиральними циліндрами / М.І. Верхола, І.Б. Гук // Комп'ютерні технології друкарства : Збірник наукових праць / УАД. – Львів, 2006. – №16. – С.3-13.
16. *Иванов В.А.* Основы теории автоматического регулирования / В.А. Иванов, Б.К. Чемоданов, В.С. Медведев.– М.: Высшая школа, 1971. – 808 с.
17. *Куо Б.* Теория и проектирование цифровых систем управления. / Б. Куо. – М.: Машиностроение. – 1986. – 448 с.
18. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №58823 Україна. Комп'ютерна програма для автоматичного визначення коефіцієнтів зонального заповнення друкарських форм «InkUnit» («InkUnit») / Р.М. Споляк, М.І. Верхола – УАД МОН УКРАЇНИ; дата реєстр. 26.02.2015.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.3862078>

Поступила 7.10.2019р.