

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-369-33>

УДК 655.326:681.5:667.5

КОХАНОВСЬКИЙ ВАСИЛЬ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0002-4804-884X>

e-mail: v.kokhanovskyi@kpi.ua

СЕМЕНІЩЕВА АНАСТАСІЯ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0002-4804-884X>

e-mail: semenishevaanastasiya@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ДОЗУВАННЯ І ПОДАЧІ ФАРБИ В ТРАФАРЕТНИХ ДРУКАРСЬКИХ МАШИНАХ

Стаття присвячена питанню розробки керованого дозувального вузла та обґрунтуванню параметрів циклічної подачі фарби відповідно до технологічного навантаження трафаретної машини. Розрахункове дослідження охопило 8 конфігурацій трафаретної сітки, 9 режимів завантаження та 10 режимів стендової перевірки. Застосовано матеріальний баланс, степеневу реологічну модель, розрахунок гвинтового приводу й дискретне коригування дози за зворотним зв'язком. Для сіток 90–300 ниток/дюйм циклове перенесення становило 2,25–2,98 мл. При збільшенні площі задруковування від 20 до 100 % командна доза зросла від 0,90 до 4,40 мл, тоді як хвилинна подача збільшилася від 7,2 до 105,6 мл/хв. Це зіставлення, власне, показує непридатність фіксованого часу відкриття клапана для змінного навантаження. Для поршня діаметром 32 мм фактична подача становить 3,72 мл/об, а розрахунковий момент із запасом досягає 0,675 Н·м. Межа застосовності результатів пов'язана з необхідністю стендової верифікації цільових метрологічних параметрів. Запропоноване рішення поєднує розрахунок матеріальної потреби з корекцією наступної дози за поточним запасом. Конструктори поліграфічного обладнання можуть використати отримані параметри для проєктування дозувальних модулів і налаштування сервоприводу.

Ключові слова: автоматизація, технічні вимірювання, технічна експлуатація, поліграфічне машинобудування, трафаретний друк, фарбоподача, друкарська машина.

KOKHANOVSKIY VASYL, SEMENISHCHEVA ANASTASIIA

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC INK DOSING AND FEEDING SYSTEM FOR SCREEN PRINTING MACHINES

The article focuses on developing a controlled dosing unit for screen-printing equipment and substantiating cyclic ink-feeding parameters under variable technological loads. The computational study covered eight screen-mesh configurations, nine machine-loading modes, and ten target bench-testing modes. The methodology combined material-balance calculations, a power-law rheological model describing ink flow through the delivery channel, screw-drive load calculations, and discrete feedback correction of the commanded dose. For screen meshes ranging from 90 to 300 threads per inch, the calculated cyclic ink transfer varied between 2.25 and 2.98 mL. Increasing print coverage from 20% to 100% raised the commanded dose from 0.90 to 4.40 mL, whereas the corresponding delivery rate increased from 7.2 to 105.6 mL/min. This nonlinear relationship demonstrates that a fixed valve-opening time cannot provide stable feeding when printing conditions change. A piston diameter of 32 mm and a screw pitch of 5 mm produced an actual displacement of approximately 3.72 mL per revolution. The calculated drive torque, including a safety factor of 1.5, reached 0.675 N·m. The proposed design integrates a piston dosing mechanism, servo drive, pressure sensor, shut-off valve, transport channel, ink-reserve sensor, and multi-outlet distributor within a closed control loop. Dose calculation combines the material demand of each printing cycle with correction based on the actual ink reserve before the subsequent cycle. The operating range covers cyclic doses of 0.50–4.50 mL at pressures up to 0.50 MPa. The obtained parameters can support engineering design, component selection, and servo-drive configuration. Their applicability remains conditional on bench verification of dosing accuracy, repeatability, response time, post-dripping, pressure stability, and residual ink-volume deviations under representative screen-printing operating conditions.

Keywords: automation, technical measurements, technical operation, printing machinery manufacturing, screen printing, ink feeding, printing machine.

Стаття надійшла до редакції / Received 15.08.2026

Прийнята до друку / Accepted 09.10.2026

Опубліковано / Published 15.10.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Кохановський Василь, Семеніщева Анастасія

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Забезпечення стабільного поповнення витратного матеріалу відповідно до його фактичної витрати впродовж кожного робочого циклу є критичним завданням для серійного трафаретного друку. Традиційне ручне внесення фарби спричиняє хаотичні коливання її об'єму перед ракульним механізмом, що суттєво посилює залежність технологічного процесу від людського чинника та ускладнює підтримання необхідної точності нанесення. Упровадження автоматизованого керованого дозування потребує точного узгодження продуктивності подавального механізму з геометричними параметрами сітки, площею задруковування, реологічними властивостями фарби та загальною швидкістю друку. Для галузі поліграфічного обладнання це формує потребу в розробці компактного вузла, здатного адаптивно синхронізувати механічну подачу матеріалу з поточним ритмом його роботи.

Існуючі методи подавання фарби не спроможні одночасно виконувати розрахунок необхідної циклової дози, здійснювати моніторинг залишкового об'єму та коригувати обсяг наступної порції на основі реального стану робочої зони. Застосування фіксованої тривалості подавання не бере до уваги динамічну зміну гідрравлічного опору, фактичні витрати матеріалу та специфіку конкретного друкарського завдання. Вирішення цієї проблеми полягає у створенні цілісної конструкції, яка інтегрує дозатор, приводну систему, транспортний канал, первинні перетворювачі та керований розподільник. Головне інженерне завдання зводиться до розрахунку оптимальних параметрів зазначених елементів, їхнього раціонального взаємного компонування та розробки алгоритму циклічного керування, що забезпечить високу стабільність подавання фарби під час тривалого друку.

Аналіз досліджень і публікацій

У праці Б. Н. Алтай [1] систематизовано ключові вимоги до складу функціональних фарб для різноманітних друкарських технологій. Автором визначено чіткі залежності технологічної поведінки матеріалу від його в'язкості, поверхневого натягу, швидкості випаровування розчинника та специфіки умов затвердіння. Водночас проблематика автоматизованого регулювання порційної подачі безпосередньо в процесі друку залишилася поза увагою дослідника. У роботі У. Дедхія [2] представлено конструкцію автоматизованої трафаретної машини. Це дослідження зосереджено на механізації послідовності основних друкарських операцій, однак параметри адаптивного живлення робочої зони фарбою потребують додаткового інженерного обґрунтування та опрацювання.

Дослідження Х. Хендріко, П. Д. Багаскари та Д. М. Пермани [4] присвячене розробці автоматичної машини для трафаретного нанесення зображень на циліндричні вироби. Запропоноване конструктивне рішення розширює можливості автоматизації поліграфічного обладнання, але не передбачає використання замкненої системи керування обсягом матеріалу відповідно до його поточних витрат. С. Кулкарні та співавтори [7] провели аналіз мехатронного пристрою автоматизованого живлення фарбою. Розроблена ними система інтегрує електромеханічне переміщення та насосну подачу. При цьому невирішеним питанням залишається забезпечення точності формування окремої порції в умовах змінного технологічного навантаження.

У праці Л. Нея та співавторів [12] доведено залежність стабільності трафаретного процесу від реологічних властивостей, седиментаційних явищ і випаровування складників фарби. Результати експериментального порівняння дванадцяти розчинників підтвердили критичну необхідність урахування фізико-хімічних характеристик матеріалу під час організації його подавання. М. Нтагіос, Х. Нассар і Р. Дахія [13] розробили замкнену екструзійну систему з можливістю керування тиском, діаметром сопла та швидкістю нанесення. Проте відповідний принцип вивчався виключно стосовно потреб адитивного виробництва, а не циклічного трафаретного друку. Дослідження Л. Оздеміра та співавторів [14] продемонструвало залежність витрати фарби від лініатури сітки, типу матеріалу та характеристик основи. Визначено, що найвагомішим технологічним чинником є параметри сітки, однак питання автоматичного коригування циклової дози у цій праці не досліджувалося. Узагальнення практичних параметрів плоского трафаретного друку та режимів налаштування його робочих елементів виконано у роботі Т. Туомаала та співавторів [16]. Попри це, взаємозв'язок зазначених параметрів із конструктивними особливостями керованого дозатора залишається недостатньо формалізованим. Зазначена обставина обґрунтовує доцільність розробки мехатронного вузла, який поєднуватиме розрахунок циклової потреби, контроль наявного запасу, дозоване переміщення матеріалу та корекцію подачі за принципом зворотного зв'язку.

Формулювання цілей статті

Мета статті – розробити конструкцію автоматизованого вузла, що забезпечує адаптивне дозування фарби відповідно до параметрів друкарського циклу.

Виклад основного матеріалу

Для трафаретної машини дозувальний вузол має компенсувати матеріал, фактично вилучений із робочого шару протягом кожного друкарського циклу. Розрахунок лише за середньою витратою тут недостатній. Потрібні також запас фарби перед ракельною кромкою, нерівномірність перенесення через сітку та часовий інтервал, доступний для поповнення. Промислові системи вже використовують окремі конструктивні рішення, придатні для такого вузла. InkStar містить картридж, рухомий дозатор, електропривод, мікропроцесорний контролер та ультразвукові датчики рівня [10, с. 78]. Фарба витискається стисненим повітрям, а її запас автоматично відновлюється після зниження рівня.

У компактних системах «easy fill» максимальний робочий тиск становить 6,5 бар. Автоматизовані установки наповнення картриджів забезпечують об'ємну похибку менш ніж 0,5 % та продуктивність до 20 картриджів за хвилину. Трафаретний процес формує інші навантаження на дозатор. У дослідженні каталітичних фарб на сітку подавали 5,6–7,6 г пасти, а друкарський ракель рухався зі швидкістю 300 мм/с [3]. Швидкість ракеля становила 80 мм/с, зусилля притискання 100 Н, відрив трафарету 1,2 мм. Використовувалася сітка 230 ниток/дюйм із дротом діаметром 0,030 мм. Ці значення показують, що дозатор працює не з безперервною подачею, а з циклічно змінним матеріальним потоком. Геометрія сітки формує першу розрахункову складову витрати. Для квадратного плетіння крок ниток і ширину відкритої комірки можна визначити через кількість ниток:

$$p_m = \frac{25,4}{N_m}, a_m = p_m - d_w, \psi_m = \left(\frac{a_m}{p_m}\right)^2 \quad (1)$$

де:

p_m – крок сітки, мм;

N_m – кількість ниток на один дюйм, 1/in;
 a_m – розрахункова ширина відкритої комірки, мм;
 d_w – діаметр нитки сітки, мм;
 ψ_m – геометрична частка відкритої площі сітки.

Для $N_m=230$ 1/in та $d_w=0,030$ мм отримаємо $p_m=0,1104$ мм, $a_m=0,0804$ мм і $\psi_m=0,530$. Відкрита площа такої сітки становить приблизно 53,0 %. Вихідні параметри відповідають режиму, використаному в експериментальному трафаретному друці. Для авторського інженерного розрахунку об'єм матеріалу, який потенційно переноситься через трафарет за один цикл, краще буде визначати не лише через товщину шару [8]. В цьому випадку врахуємо геометрію сітки, шар фарби та коефіцієнт фактичного звільнення комірок:

$$V_{tr} = A_p \varphi [t_m \psi_m + h_e] k_f k_r = A_p \varphi \left[t_m \left(1 - \frac{N_m d_w}{25.4} \right)^2 + h_e \right] k_f k_r \quad (2)$$

де:

V_{tr} – розрахунковий об'єм перенесеної фарби, мл/цикл;
 A_p – площа друку, м²;
 φ – частка задрукованої площі;
 t_m – товщина сітки, мкм;
 h_e – товщина емульсії над сіткою, мкм;
 k_f – коефіцієнт фактичного заповнення відкритих комірок;
 k_r – коефіцієнт вивільнення фарби після проходження ракеля.

Саме геометрію сітки не можна вилучати з розрахунку. У прикладних дослідженнях збільшення кількості комірок зменшувало фактичну витрату фарби. Інший огляд наводить діапазон діаметрів нитки приблизно від 165 до 9–11 мкм та діапазон отримуваної товщини шару від 200 до 6 мкм. Для зіставлення режимів виконаємо розрахунок за формулами (1)–(2). Значення $k_f k_r$ прийнято як розрахунковий коефіцієнт перенесення, а не як довідкову характеристику конкретної фарби (табл. 1).

Таблиця 1

Розрахунки геометричної місткості сітки та циклової потреби у фарбі

№ з/п	N_m , 1/in	d_w , мкм	p_m , мкм	a_m , мкм	ψ_m , %	t_m , мкм	h_e , мкм	$A_p \varphi$, м ²	$k_f k_r$	V_{tr} , мл/цикл
1	90	80	282,2	202,2	51,4	140	15	0,035	0,74	2,25
2	120	64	211,7	147,7	48,7	115	14	0,045	0,75	2,36
3	150	55	169,3	114,3	45,6	95	13	0,055	0,76	2,35
4	180	45	141,1	96,1	46,4	82	12	0,065	0,77	2,50
5	200	40	127,0	87,0	46,9	75	11	0,075	0,78	2,70
6	230	30	110,4	80,4	53,0	65	10	0,085	0,79	2,98
7	250	30	101,6	71,6	49,6	60	9	0,095	0,80	2,95
8	300	25	84,7	59,7	49,7	52	8	0,105	0,81	2,88

Джерело: сформовано авторами за даними [5; 11]

Таблиця 1 показує інженерну особливість процесу: збільшення кількості ниток сітки на одиницю довжини саме по собі не визначає циклову дозу. Зміни залежать від діаметра нитки, відкритої площі, товщини сітки та робочої площі задруковування.

Наступний розрахунковий блок стосується реологічного опору транспортної магістралі. Трафаретні фарби мають виражену залежність в'язкості від швидкості зсуву. В одному з практичних прикладів в'язкість фарби становила 2,0–5,5 Pa·s. Для друкарського процесу також необхідно зменшувати швидкість ракеля при підвищенні в'язкості. Робочі швидкості нижче 25 мм/с відносяться до повільних, а понад 150 мм/с до швидких. Для розрахунку подавання густої фарби приймемо степеневу реологічну модель [5]. Перепад тиску в круглому каналі тоді визначається виразом:

$$\Delta p_f = \frac{2KL}{R} \left[\frac{(3n_r+1)Q}{\pi n_r R^3} \right]^{n_r} + \sum_{j=1}^m \zeta_j \frac{\rho v^2}{2} + \Delta p_v \quad (3)$$

де:

Δp_f – потрібний перепад тиску в тракці, Па;
 K – індекс консистенції фарби, Pa·s ^{n_r} ;
 L – сумарна довжина транспортного каналу, м;
 R – внутрішній радіус каналу, м;
 n_r – індекс течії степеневі моделі;
 Q – об'ємна витрата фарби, м³/с;
 ζ_j – коефіцієнт місцевого опору j -го елемента;
 ρ – густина фарби, кг/м³;
 v – середня швидкість потоку, м/с;
 Δp_v – додатковий перепад на клапани та розподільний насадці, Па.

Перший доданок враховує в'язкий опір псевдопластичного матеріалу. Другий описує штуцери, повороти, клапани та переходи перерізу. Третій потрібний для кінцевої насадки, де площа потоку зменшується безпосередньо перед дозуванням. Миттєва потреба вузла в фарбі формується дискретно. Для i -го циклу матеріальний баланс робочої зони записуємо у вигляді:

$$V_{w,i+1} = V_{w,i} + \eta_d Q_i t_{d,i} - V_{tr,i} - k_s V_{tr,i} - k_e A_f \Delta t_i \quad (4)$$

де:

$V_{w,i}$ – запас фарби перед початком i -го циклу, мл;

η_d – об'ємний ККД дозувального тракту;

Q_i – фактична продуктивність дозатора, мл/с;

$t_{d,i}$ – тривалість відкриття подавання, с;

$V_{tr,i}$ – перенесений через трафарет об'єм, мл;

k_s – частка матеріалу, що залишається на сітці поза робочим валиком;

k_e – питомий коефіцієнт втрати леткої складової, мл/(м²·с);

A_f – відкрита площа шару фарби, м²;

Δt_i – тривалість циклу, с.

Формула (4) потрібна саме для автоматичного дозування. Постійна доза працюватиме лише при незмінній площі задруковування, швидкості машини та стані фарби. При серійному друці ці умови порушуються через нагрів, випаровування та зміну кількості матеріалу на сітці. Дані щодо відкритого резервуара підтверджують цю проблему. Для плоскодрукарського трафаретного процесу випаровування розчинника змінювало стабільність фарби, тому дослідники окремо оцінювали контактний кут, реологію та седиментацію [6].

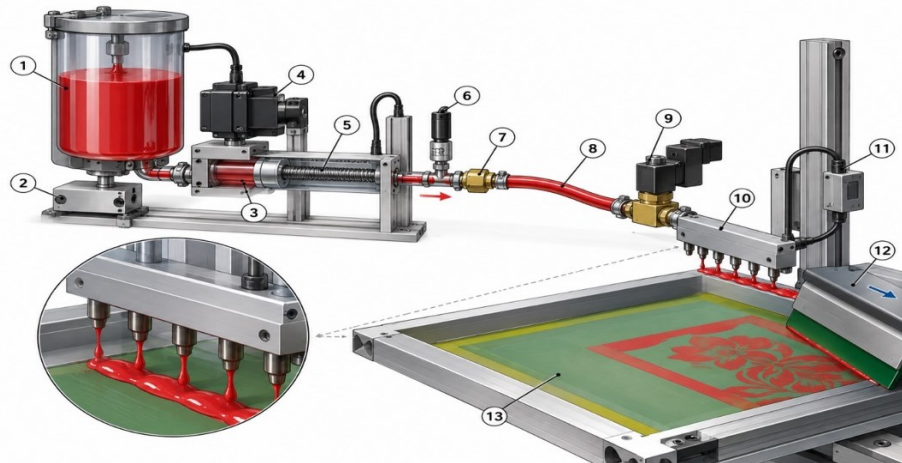


Рис. 1. Розрахункова структурно-гідралічна схема автоматичного вузла подачі та дозування фарби (1 – герметичний резервуар; 2 – датчик маси резервуара; 3 – поршнева камера; 4 – сервопривод; 5 – гвинтова передача; 6 – датчик тиску; 7 – зворотний клапан; 8 – гнучка магістраль; 9 – електромагнітний відсічний клапан; 10 – розподільна насадка; 11 – датчик запасу фарби; 12 – ракель; 13 – трафарет)

Джерело: побудовано авторами в середовищі SolidWorks

Для поршневого дозатора осьове зусилля визначимо через тиск, сили ущільнення та динамічну складову:

$$F_{\Sigma} = \Delta p_f \frac{\pi D_p^2}{4} + F_{seal} + m_{eq} a_p \quad (5)$$

де:

F_{Σ} – сумарне осьове зусилля, Н;

D_p – діаметр поршня, м;

F_{seal} – сила тертя ущільнення, Н;

m_{eq} – приведена маса рухомих деталей, кг;

a_p – прискорення поршня, м/с².

Для гвинтової передачі потрібний момент сервоприводу становитиме:

$$M_m = \frac{F_{\Sigma} p_s}{2\pi \eta_s i_g} + \frac{J_{\Sigma}}{i_g} \frac{d\omega_s}{dt} + M_{fr} \quad (6)$$

де:

M_m – момент на валу двигуна, Н·м;

p_s – крок гвинта, м;

η_s – ККД гвинтової передачі;

i_g – передаточне число редуктора;

J_{Σ} – приведений момент інерції, кг·м²;

ω_s – кутова швидкість гвинта, рад/с;

M_{fr} – момент механічного опору, Н·м.

Тут уже формується реальна вимога до конструкції. Потрібна продуктивність пов'язана з діаметром поршня, кроком гвинта, частотою обертання та об'ємним ККД дозатора одночасно:

$$Q_d = \eta_v \frac{\pi D_p^2}{4} \frac{p_s n_m}{60 i_g} \quad (7)$$

де:

Q_d – продуктивність дозатора, м³/с;

η_v – об'ємний ККД дозатора;

n_m – частота обертання двигуна, хв⁻¹;

Для проектування прийнято поршневу схему з діаметром 32 мм, кроком гвинта 5 мм та регульованою швидкістю. Розрахункова матриця нижче поєднує витрату, тиск, осьове навантаження, швидкість поршня та необхідний момент приводу (табл. 2). Числові значення є проектними для подальшої розробки, а не паспортними параметрами існуючої машини.

Таблиця 2

Навантажувальна матриця дозувального тракту та сервоприводу

№ з/п	Q_d , мл/с	Δp_f , bar	D_p , мм	Швидкість поршня, мм/с	F_p , Н	Крок гвинта, мм	n , хв ⁻¹	M_{calc} , Н·м	Запас моменту 1,5, Н·м	Доза за 1,0 с, мл
1	0,50	0,6	32	0,62	48,3	5	7,5	0,054	0,081	0,50
2	1,00	0,9	32	1,24	72,4	5	14,9	0,081	0,122	1,00
3	1,50	1,2	32	1,87	96,5	5	22,4	0,108	0,162	1,50
4	2,00	1,6	32	2,49	128,7	5	29,9	0,144	0,216	2,00
5	2,50	2,0	32	3,11	160,8	5	37,3	0,180	0,270	2,50
6	3,00	2,5	32	3,73	201,1	5	44,8	0,225	0,338	3,00
7	3,50	3,2	32	4,35	257,4	5	52,2	0,288	0,432	3,50
8	4,00	4,0	32	4,97	321,7	5	59,7	0,360	0,540	4,00
9	4,50	5,0	32	5,60	402,1	5	67,2	0,450	0,675	4,50

Джерело: сформовано авторами

З таблиці 2 видно, що найбільше навантаження формує не швидкість поршня, а гідравлічний опір тракту. При зростанні тиску від 0,6 до 5,0 bar осьове навантаження збільшується приблизно у 8,3 рази. Розрахунковий момент після введення коефіцієнта запасу 1,5 досягає 0,675 Н·м. Для системи доцільно задати робочу межу тиску 5,0 bar, а аварійне відключення встановити на рівні 6,0 bar. Визначений поріг є нижчим за 6,5 bar, і він наведений для промислової картриджної системи. Ці умови залишають тиск 1,5 bar між номінальним максимумом і відомою верхньою межею пневматичного обладнання друкарської машини [9, с. 88].

Технічне завдання на подальшу розробку тоді набуває конкретних числових меж. Дозатор повинен забезпечувати 0,5–4,5 мл/с при робочому тиску 0,6–5,0 bar. Разова доза має регулюватися щонайменше в межах 0,25–10,0 мл. Похибка в центральній частині діапазону приймається не більше $\pm 1,0$ %, а при дозах нижче 0,5 мл до $\pm 2,0$ %. Час реакції після сигналу датчика приймається до 0,25 с. Об'ємний запас тракту після закриття клапана має бути мінімальним, інакше залишковий тиск створюватиме подальше витікання фарби. Знайдений параметр стане одним із визначальних під час конструювання кінцевої насадки та вибору відсічного клапана. Робочий діапазон швидкості ракеля слід закласти щонайменше від 25 до 300 мм/с. Нижня межа узгоджується з практичними рекомендаціями для повільного режиму, а 300 мм/с уже застосовували в експериментальному плоскодрукарському процесі. Відрив трафарету для базової конфігурації можна прийняти 1,0–3,0 мм, причому для формату А3 у джерелі наведено саме такий інтервал.

Нова конструкція побудована за принципом дозованого витіснення фарби з герметичної циліндричної камери безпосередньо в зону перед ракельним механізмом. Така компоновка скорочує довжину напірної магістралі та зменшує об'єм фарби між дозатором і вихідним клапаном. Останній параметр визначає залишкове витікання після завершення команди. До складу вузла введено резервуар місткістю 2,0 л, поршневий дозатор діаметром 32 мм, кульково-гвинтову передачу та сервопривод. Транспортний канал має внутрішній діаметр 8 мм. Перед розподільником встановлено датчик тиску 0–0,6 МПа, а робочий запас фарби контролює безконтактний датчик. Кінцевий електромагнітний клапан розміщено перед розподільною насадкою, що зменшує об'єм фарби [15]. Запропоновано оновлену конструктивну схему вузла з координатною прив'язкою до ракельного механізму (рис. 2).

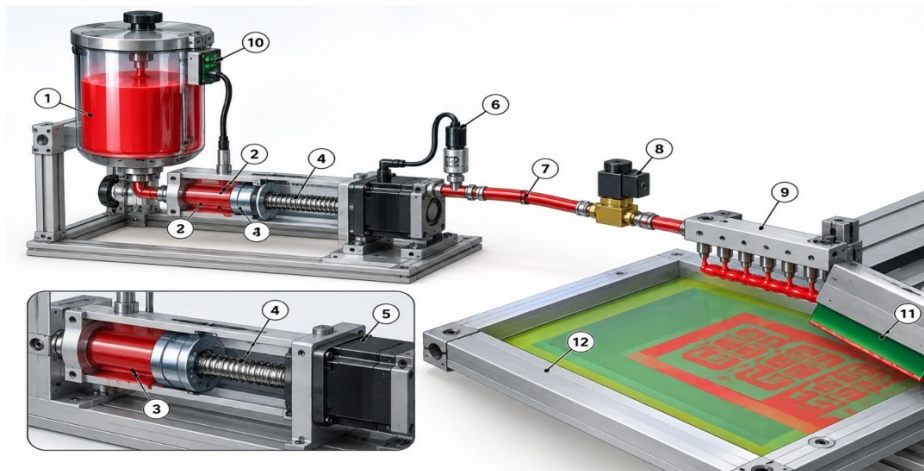


Рис. 2. Конструктивно-кінематична схема автоматичного дозувально-подавального вузла (1 – резервуар; 2 – поршнева камера; 3 – поршень; 4 – кульково-гвинтова передача; 5 – сервопривод; 6 – датчик тиску; 7 – напірний канал; 8 – відсічний клапан; 9 – розподільник; 10 – датчик запасу фарби; 11 – ракель; 12 – трафаретна сітка)
Джерело: побудовано авторами в середовищі SolidWorks

Розподільник установлюється паралельно робочій кромці ракеля на відстані 35 мм від його початкового положення. Вісім вихідних отворів діаметром 2,0 мм розташовуються з кроком 35 мм. За робочої ширини 280 мм така геометрія формує вісім локальних зон подавання. Геометричну подачу поршневого дозатора за один оберт гвинта визначаємо з урахуванням фактичної об'ємної ефективності:

$$V_{1r} = \frac{\pi D_p^2}{4} p_s \eta_v \left[1 - \frac{\Delta p}{K_c} - \lambda_s \left(\frac{v_p}{v_0} \right)^2 \right] \quad (8)$$

де:

V_{1r} – фактичний об'єм фарби за один оберт гвинта, мл/об;

D_p – діаметр поршня дозатора, мм;

p_s – крок гвинтової передачі, мм/об;

η_v – об'ємний ККД дозувального вузла;

Δp – перепад тиску в транспортному тракті, МПа;

K_c – приведена об'ємна жорсткість системи, МПа;

λ_s – коефіцієнт динамічних втрат;

v_p – швидкість переміщення поршня, мм/с;

v_0 – базова швидкість поршня, мм/с.

При $D_p=32$ мм і $p_s=5$ мм геометричне витіснення дорівнює 4,02 мл/об. За $\eta_v=0,94$, $\Delta p=0,30$ МПа, $K_c=25$ МПа та малої динамічної поправки фактичне значення становить близько 3,72 мл/об. Отриманий параметр задає зв'язок між командою сервоприводу та фізичною дозою. Циклова доза повинна змінюватися разом із площею рисунка та параметрами трафарету. У попередній частині встановлено, що геометрія сітки безпосередньо впливає на перенесення фарби. Зокрема, збільшення кількості ниток знижує її споживання, а діаметр нитки та відкрита площа змінюють гідралічний опір комірок. Для керування дозатором запропоновано розраховувати командну дозу окремо для кожного циклу:

$$V_{c,i} = \frac{A_p \varphi_i \left[t_m \left(1 - \frac{N_m d_w}{25.4} \right)^2 + h_e \right] k_{f,i} k_{r,i}}{\eta_{v,i}} + K_P e_i + K_I \sum_{j=1}^i e_j \Delta t + K_D \frac{e_i - e_{i-1}}{\Delta t} \quad (9)$$

де:

$V_{c,i}$ – командна доза для i -го циклу, мл;

A_p – площа друкарського поля, м²;

φ_i – коефіцієнт задруковування поточного рисунка;

t_m – товщина трафаретної сітки, мкм;

N_m – кількість ниток сітки на один дюйм, 1/in;

d_w – діаметр нитки сітки, мм;

h_e – товщина емульсійного шару, мкм;

$k_{f,i}$ – коефіцієнт заповнення відкритих комірок;

$k_{r,i}$ – коефіцієнт вивільнення фарби із сітки;

$\eta_{v,i}$ – об'ємний ККД дозатора;

e_i – відхилення фактичного запасу фарби від заданого, мл;

K_P , K_I , K_D – коефіцієнти коригувального регулятора;

Δt – період дискретизації керування, с.

Перша частина рівняння формує базову матеріальну потребу. Решта складових коригує її за фактичним запасом фарби. Отже, контролер не замінює розрахункову модель, а компенсує накопичену похибку перенесення та дозування [17]. Для дев'яти режимів отримано параметри, потрібні для програмування сервоприводу (табл. 3). Розрахунок виконано для дозатора $D_p=32$ мм із фактичною подачею 3,72 мл/об.

Таблиця 3

Карта команд дозатора для змінного завантаження трафаретної машини

№ з/п	Задрукуваність, %	Базова доза, мл	Корекція запасу, мл	Командна доза, мл	Оберт поршневого приводу, об	Кут гвинта, град.	Час подачі, с	Частота циклів, хв ⁻¹	Хвилинна подача, мл/хв
1	20	0,82	+0,08	0,90	0,242	87,1	0,31	8	7,2
2	30	1,23	+0,09	1,32	0,355	127,7	0,39	10	13,2
3	40	1,64	+0,12	1,76	0,473	170,3	0,48	12	21,1
4	50	2,05	+0,14	2,19	0,589	212,0	0,57	14	30,7
5	60	2,46	+0,18	2,64	0,710	255,5	0,66	16	42,2
6	70	2,87	+0,21	3,08	0,828	298,1	0,75	18	55,4
7	80	3,28	+0,24	3,52	0,946	340,6	0,84	20	70,4
8	90	3,69	+0,27	3,96	1,065	383,4	0,93	22	87,1
9	100	4,10	+0,30	4,40	1,183	425,9	1,02	24	105,6

Джерело: сформовано авторами

Зростання коефіцієнта задрукуваності від 20 до 100 % збільшує командну дозу від 0,90 до 4,40 мл. Хвилинна подача одночасно зростає у 14,7 рази через сумісну зміну дози та частоти циклів. Така нелінійність виключає керування дозатором лише за фіксованим часом відкриття клапана. Для визначення механічного навантаження сервоприводу врахуємо тиск, тертя ущільнень, інерцію поршня та параметри гвинтової передачі:

$$M_{req} = k_s \left[\frac{\left(\Delta p \frac{\pi D_p^2}{4} + F_{seal} + m_{eq} \frac{dv_p}{dt} \right) p_s}{2\pi \eta_s i_g} + \frac{J_{eq} d\omega}{i_g dt} + M_b \right] \quad (10)$$

де:

M_{req} – потрібний момент сервоприводу, Н·м;

k_s – коефіцієнт запасу приводу;

Δp – максимальний перепад тиску, Па;

D_p – діаметр поршня, м;

F_{seal} – сила тертя ущільнень, Н;

m_{eq} – приведена маса рухомих елементів, кг;

d_{vp} – прискорення поршня, м/с²;

p_s – крок гвинта, м;

η_s – ККД гвинтової передачі;

i_g – передаточне число;

J_{eq} – приведений момент інерції, кг·м²;

$d\omega$ – кутове прискорення, рад/с²;

M_b – момент опору підшипників та ущільнень, Н·м.

При $\Delta p=0,50$ МПа тиск створює на поршні діаметром 32 мм силу близько 402 Н. Якщо прийняти $F_{seal}=35$ Н, $k_s=1,5$, $p_s=5$ мм та $\eta_s=0,90$, статична складова потрібного моменту наближається до 0,58 Н·м. Після врахування прискорення і механічного опору для експериментального вузла приймаємо сервопривод із номінальним моментом 1,0 Н·м. Потужність приводу перевіряємо за найбільш навантаженим режимом:

$$P_m = \frac{k_p}{\eta_m} \left[\Delta p Q_d + F_{seal} v_p + J_{eq} \omega \frac{d\omega}{dt} \right] \quad (11)$$

де:

P_m – розрахункова потужність сервоприводу, Вт;

k_p – коефіцієнт запасу потужності;

η_m – ККД електромеханічного приводу;

Q_d – миттєва об'ємна подача, м³/с;

v_p – швидкість поршня, м/с;

інші показники відповідають формулі (10).

Алгоритм роботи прив'язано до машинного циклу, а не до незалежного таймера. Після завершення друкарського ходу контролер отримує сигнал про положення ракеля. Далі визначається фактичний запас фарби, розраховується командна доза для i -го циклу, відкривається клапан і запускається сервопривод. Після виконання заданого кута повороту контролер перевіряє рівень та тиск. Наступна команда вже містить корекцію накопиченої похибки [11, с. 51]. Друга авторська розробка подає цей процес як замкнений алгоритм циклічного керування (рис. 3). На відміну від періодичного дозування, тут команда формується з двох потоків даних: технологічних параметрів завдання та поточного стану робочої зони.

Експериментальний зразок передбачає жорстке кріплення дозатора до станини та окрему опору розподільної насадки. Напірна магістраль має довжину 0,45 м і внутрішній діаметр 8 мм. Післяклапанний канал скорочено до 45 мм. Запропонована компоновка забезпечуватиме зменшення кількості фарби, яка продовжує рух після закриття клапана.

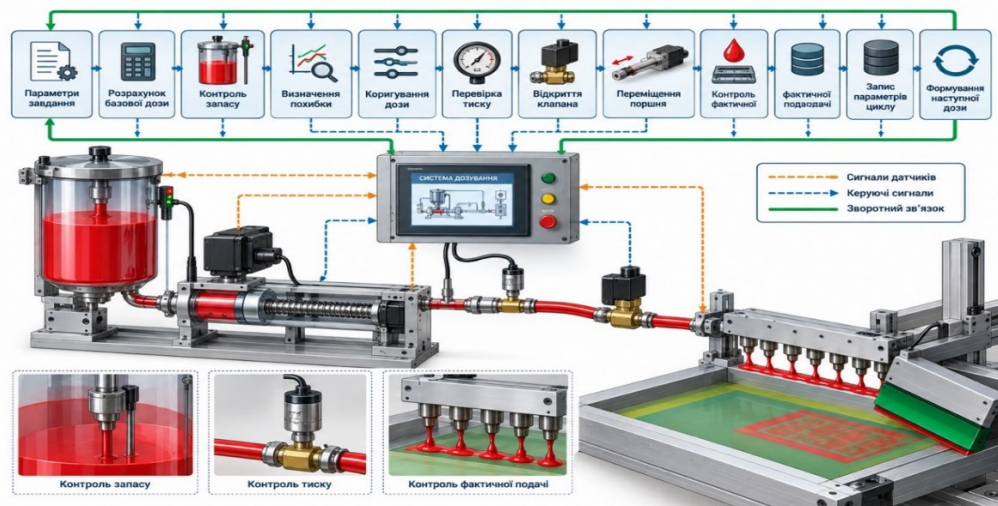


Рис. 3. Структурно-алгоритмічна схема адаптивного циклічного дозування фарби
Джерело: побудовано авторами в середовищі SolidWorks

Перевірка формується за дев'ятьма режимами. Для кожного режиму виконується серія циклів із гравіметричним контролем фактичної дози. Основними показниками прийнято відносну похибку, коефіцієнт варіації, час реакції, витікання, залишковий об'єм та кількість коригувань. Комплексну похибку подавання визначаємо не лише за середньою дозою:

$$E_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{\bar{V}_f - V_c}{V_c}\right)^2 + \left(\frac{s_V}{V_f}\right)^2 + \left(\frac{V_{dr}}{V_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_r}{V_c}\right)^2} \cdot 100\% \quad (12)$$

де:

E_{Σ} – інтегральна похибка циклового подавання, %;

$\bar{V}_f$ – середня фактична доза, мл;

V_c – задана командна доза, мл;

s_V – середньоквадратичне відхилення дози, мл;

V_{dr} – об'єм витікання фарби після закриття клапана, мл;

ΔV_r – відхилення робочого запасу від заданого, мл.

Для проектної оцінки експериментального зразка сформовано розрахунковий протокол (табл. 4). Наведені значення є цільовими параметрами майбутньої стендової перевірки, а не результатами вже виконаного фізичного експерименту.

Таблиця 4

Цільові дані метрологічних і динамічних параметрів експериментального дозувального вузла

№ з/п	Задана доза, мл	Допустима похибка, %	s_V , не більше, %	Час реакції, мс	Після витікання, мл	Залишкова похибка запасу, мл	Робочий тиск, МПа	Час дозування, с	Допустимі корекції на 100 циклів
1	0,50	2,00	2,50	250	0,030	0,15	0,08	0,25	12
2	0,75	1,80	2,20	240	0,032	0,16	0,10	0,30	11
3	1,00	1,60	2,00	230	0,035	0,18	0,13	0,35	10
4	1,50	1,40	1,80	220	0,038	0,20	0,17	0,43	9
5	2,00	1,20	1,60	210	0,040	0,22	0,22	0,51	8
6	2,50	1,10	1,50	205	0,043	0,24	0,27	0,60	8
7	3,00	1,00	1,40	200	0,045	0,26	0,32	0,69	7
8	3,50	1,00	1,30	195	0,048	0,28	0,38	0,78	7
9	4,00	1,00	1,25	190	0,050	0,30	0,44	0,88	6
10	4,50	1,00	1,20	185	0,052	0,32	0,50	0,98	6

Джерело: сформовано авторами

Для малих доз найбільш жорстким параметром стає не тиск, а подальше витікання. При дозі 0,50 мл залишкові 0,03 мл уже становлять 6 % заданого об'єму. Тому відсічний клапан потрібно встановлювати максимально близько до розподільної насадки. Цей конструктивний параметр не компенсується підвищенням точності сервоприводу. Для порівняння автоматичного та ручного режимів доцільно використовувати питомий матеріальний показник. Він враховує не лише нанесену фарбу, але й залишок після завершення тиражу:

$$K_u = \frac{m_{print}}{m_{load} - m_{res} - m_{clean}}, \Delta G = \frac{G_{man} - G_{aut}}{G_{man}} \cdot 100\% \quad (13)$$

де:

K_u – коефіцієнт використання поданої фарби;

m_{print} – маса фарби, перенесеної на продукцію, г;
 m_{load} – початкова маса завантаженої фарби, г;
 m_{res} – повернений придатний залишок, г;
 m_{clean} – маса фарби, вилученої під час очищення, г;
 ΔG – відносне скорочення витрати автоматичною системою, %;
 G_{man} – питома витрата у ручному режимі, г/1000 відбитків;
 G_{aut} – питома витрата в автоматичному режимі, г/1000 відбитків.

Розроблений вузол розрахований на циклові дози 0,50–4,50 мл та тиск до 0,50 МПа. Його механічна частина формує дозу переміщенням поршня, тоді як електронний контур коригує її за фактичним запасом фарби. Чітке і обґрунтоване поєднання розрахункової циклової дози з корекцією за зворотним зв'язком відрізняє запропоновану систему від звичайної періодичної подачі.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальшого розвитку у даному напрямі

Визначено математичні залежності, які пов'язують геометричні характеристики трафаретної сітки, реологічні параметри фарби та необхідний об'єм циклової подачі. Зокрема, для трафаретної сітки щільністю 230 ниток на дюйм із діаметром нитки 0,030 мм розрахований показник відкритої площі становить 53,0 %. При цьому розрахункова циклічна потреба для розглянутих конфігурацій перебуває у межах від 2,25 до 2,98 мл на цикл. Обґрунтовано, що продуктивність дозатора слід розраховувати з обов'язковим урахуванням площі задруковування, товщини сітки, шару фарби, а також коефіцієнтів заповнення та вивільнення фарби. Запропонована методика дасть можливість відмовитися від подачі фіксованого об'єму та забезпечить повне узгодження роботи системи з фактичними параметрами друку.

Представлене конструктивно-кінематичне рішення автоматичного дозувально-подавального вузла, в основу якого покладено поршневий дозатор діаметром 32 мм, гвинтову передачу з кроком 5 мм і серводвигун. Конструкція включає резервуар об'ємом 2,0 л, транспортний канал із внутрішнім діаметром 8 мм та датчик тиску з діапазоном вимірювання від 0 до 0,6 МПа. Завдяки використанню розподільника з вісьмома отворами діаметром 2,0 мм реалізовано точкове внесення фарби по всій робочій ширині 280 мм. Обчислена продуктивність системи становить від 0,5 до 4,5 мл/с при робочому тиску від 0,6 до 5,0 bar, а максимальний крутний момент приводу з урахуванням коефіцієнта запасу 1,5 досягає 0,675 Н·м.

Сформований розрахунковий алгоритм адаптивного циклічного дозування, який здійснює корекцію базової розрахункової потреби залежно від наявного фактичного запасу фарби. Збільшення площі задруковування від 20 % до 100 % зумовлює зростання командної дози від 0,90 до 4,40 мл, що відповідає підвищенню хвилинної подачі від 7,2 до 105,6 мл/хв. Для створеного експериментального вузла встановлено робочий діапазон циклової дози від 0,50 до 4,50 мл при тиску до 0,50 МПа. Проведення стендових випробувань передбачає оцінювання похибки дозування, коефіцієнта варіації, часу відгуку системи, об'єму подальшого витікання та відхилення робочого запасу, що дасть змогу виконати комплексну кількісну перевірку заявлених технічних характеристик.

Література

1. Altay B. N. Ink formulation design strategies for printed electronics: a review on fundamentals, materials, and processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2026. Vol. 144. No 9-10. pp. 6215-6249. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-026-18295-z>
2. Dedhia U. Design of Automated Screen-Printing Machine. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2021. Vol. 9. No VII. pp. 2787-2797. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.36970>
3. Enke M., Schwarz N., Gruschwitz F., Winkler D., Hanf F., Jescheck L., Seyferth S., Fischer D., Schneeberger A. 3D screen printing technology enables fabrication of oral drug dosage forms with freely tailorable release profiles. *International Journal of Pharmaceutics*. 2023. Vol. 642. Article 123101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123101>
4. Hendriko H., Bagaskara P. D., Permana D. M. Development of An Automatic Cup Printing Machine Using a Screen Printing Method. Proceedings of the 11th International Applied Business and Engineering Conference, ABEC 2023, September 21st, 2023, *Bengkalis, Riau, Indonesia*. 2024. EAI. DOI: <https://doi.org/10.4108/eai.21-9-2023.2342890>
5. Hussain A., Abbas N., Ali A. Inkjet Printing: A Viable Technology for Biosensor Fabrication. *Chemosensors*. 2022. Vol. 10. No 3. Article 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors10030103>
6. Krystosiak K., Kluczek A., Werpachowski W. Analysis of proper ink management impact on overall environmental equipment efficiency for sustainability. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No 1. pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70118-x>
7. Kulkarni S., Bobade S., More S., Mahajan N., Bhoomkar M. Mechatronic System for Automatic Ink Feeding Machine. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2021. Vol. 10. No 5. pp. 5611-5616. DOI: <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2021.1005245>

8. Maatz R., Karnop P., Sylvia R., Herget T., Blaeser A. 3D bio-screen printing for high-throughput production of scaffolds for meat alternatives. *npj Science of Food*. 2026. Vol. 10. No 1. Article 155. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41538-026-00853-0>
9. Maddipatla D., Narakathu B. B., Atashbar M. Recent Progress in Manufacturing Techniques of Printed and Flexible Sensors: A Review. *Biosensors*. 2020. Vol. 10. No 12. p. 199. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios10120199>
10. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. The model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises on the basis of the formation of key competences. *Academy Review*. 2023. No 2 (59). pp. 75-89. DOI: <https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5>
11. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 2. No 13 (128). pp. 47-57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
12. Ney L., Seidl N., Singh R., Schneider P., Stross D., Göppentin A., Tepner S., Klingele M., Keding R. Screen Printing Catalyst Inks With Enhanced Process Stability for PEM Fuel Cell Production. *Fuel Cells*. 2025. Vol. 25. No 2. Article e202400158. DOI: <https://doi.org/10.1002/fuce.202400158>
13. Ntagios M., Nassar H., Dahiya R. Closed-loop direct ink extruder system with multi-part materials mixing. *Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 64. Article 103437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103437>
14. Özdemir L., Kurt M. B., Akgül A., Oktav M., Nayci Duman M. Optimization of ink consumption in screen printing within color difference limits. *Pigment & Resin Technology*. 2024. Vol. 53. No 1. pp. 17-27. DOI: <https://doi.org/10.1108/PRT-12-2021-0139>
15. Panáček D., Urban M., Silvestri A., Dědek I., Nalepa M.-A., Merkoçi A., Prato M., Otyepka M. Nanomaterial-Based Inkjet Printing for Electrochemical Sensing. *Small*. 2026. Vol. 22. No 10. Article e13028. DOI: <https://doi.org/10.1002/smll.202513028>
16. Tuomaala T., Määttä H., Tuhkala T., Tornainen N., Valasma R., Nissinen M. Practical Guide to Screen-Printing in Printed Electronics. 2nd revised ed. *Oamk Journal*. 2025. No 97. Oulu: Oulu University of Applied Sciences. ISBN: 978-951-597-262-0. <http://urn.fi/urn:isbn:978-951-597-262-0>
17. Uddin M. J., Hassan J., Douroumis D. Thermal Inkjet Printing: Prospects and Applications in the Development of Medicine. *Technologies*. 2022. Vol. 10. No 5. Article 108. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies10050108>

References

1. Altay, B. N. (2026). Ink formulation design strategies for printed electronics: A review on fundamentals, materials, and processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 144(9–10), 6215–6249. <https://doi.org/10.1007/s00170-026-18295-z>
2. Dedhia, U. (2021). Design of automated screen-printing machine. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 9(VII), 2787–2797. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.36970>
3. Enke, M., Schwarz, N., Gruschwitz, F., Winkler, D., Hanf, F., Jescheck, L., Seyferth, S., Fischer, D., & Schneeberger, A. (2023). 3D screen printing technology enables fabrication of oral drug dosage forms with freely tailorable release profiles. *International Journal of Pharmaceutics*, 642, 123101. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123101>
4. Hendriko, H., Bagaskara, P. D., & Permana, D. M. (2024). Development of an automatic cup printing machine using a screen printing method. In *Proceedings of the 11th International Applied Business and Engineering Conference (ABEC 2023)*. EAI. <https://doi.org/10.4108/eai.21-9-2023.2342890>
5. Hussain, A., Abbas, N., & Ali, A. (2022). Inkjet printing: A viable technology for biosensor fabrication. *Chemosensors*, 10(3), 103. <https://doi.org/10.3390/chemosensors10030103>
6. Krystosiak, K., Kluczek, A., & Werpachowski, W. (2024). Analysis of proper ink management impact on overall environmental equipment efficiency for sustainability. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70118-x>
7. Kulkarni, S., Bobade, S., More, S., Mahajan, N., & Bhoomkar, M. (2021). Mechatronic system for automatic ink feeding machine. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 10(5), 5611–5616. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2021.1005245>
8. Maatz, R., Karnop, P., Sylvia, R., Herget, T., & Blaeser, A. (2026). 3D bio-screen printing for high-throughput production of scaffolds for meat alternatives. *npj Science of Food*, 10(1), 155. <https://doi.org/10.1038/s41538-026-00853-0>
9. Maddipatla, D., Narakathu, B. B., & Atashbar, M. (2020). Recent progress in manufacturing techniques of printed and flexible sensors: A review. *Biosensors*, 10(12), 199. <https://doi.org/10.3390/bios10120199>
10. Makedon, V. V., Kholod, O. H., & Yarmolenko, L. I. (2023). The model for assessing the competitiveness of high-tech enterprises on the basis of the formation of key competences. *Academy Review*, 2(59), 75–89. <https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-2-59-5>
11. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
12. Ney, L., Seidl, N., Singh, R., Schneider, P., Stross, D., Göppentin, A., Tepner, S., Klingele, M., & Keding, R. (2025). Screen printing catalyst inks with enhanced process stability for PEM fuel cell production. *Fuel Cells*, 25(2), e202400158. <https://doi.org/10.1002/fuce.202400158>
13. Ntagios, M., Nassar, H., & Dahiya, R. (2023). Closed-loop direct ink extruder system with multi-part materials mixing. *Additive Manufacturing*, 64, 103437. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103437>
14. Özdemir, L., Kurt, M. B., Akgül, A., Oktav, M., & Nayci Duman, M. (2024). Optimization of ink consumption in screen printing within color difference limits. *Pigment & Resin Technology*, 53(1), 17–27. <https://doi.org/10.1108/PRT-12-2021-0139>
15. Panáček, D., Urban, M., Silvestri, A., Dědek, I., Nalepa, M.-A., Merkoçi, A., Prato, M., & Otyepka, M. (2026). Nanomaterial-based inkjet printing for electrochemical sensing. *Small*, 22(10), e13028. <https://doi.org/10.1002/smll.202513028>
16. Tuomaala, T., Määttä, H., Tuhkala, T., Tornainen, N., Valasma, R., & Nissinen, M. (2025). *Practical guide to screen-printing in printed electronics* (2nd rev. ed.). Oamk Journal, (97). Oulu University of Applied Sciences. <http://urn.fi/urn:isbn:978-951-597-262-0>
17. Uddin, M. J., Hassan, J., & Douroumis, D. (2022). Thermal inkjet printing: Prospects and applications in the development of medicine. *Technologies*, 10(5), 108. <https://doi.org/10.3390/technologies10050108>