

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-64-25>

УДК 004.421:004.94:681.7

Радченко Костянтин Олександрович, PhD, ст. викладач

<https://orcid.org/0000-0002-1282-6307>

Луценко Богдан Анатолійович, магістрант

<https://orcid.org/0009-0004-6451-6855>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ПРОГРАМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ЧАСТКОВОГО ОНОВЛЕННЯ E-INK ДИСПЛЕЇВ

Радченко К. О., Луценко Б.А. Програмне моделювання та оптимізація алгоритмів часткового оновлення E-Ink дисплеїв. У статті досліджується фундаментальна проблема візуальних артефактів (ghosting) під час часткового оновлення електрофоретичних дисплеїв (E-Ink). Для вирішення цієї проблеми розроблено спеціалізований програмний симулятор, який на глибокому математичному рівні моделює процеси накопичення залишкового заряду, інерційності мікрочастинок та деградації зображення з часом. Запропоновано та детально досліджено три парадигми оновлення екрана: наївне часткове оновлення (базовий підхід без компенсації), порогове повне оновлення на основі динамічного розрахунку середньоквадратичної помилки (MSE) та інноваційне розумне локальне спалахування (Smart Regional Flash), орієнтоване на мінімізацію площі інверсії. За допомогою довготривалої симуляції годинникового таймера протягом однієї години змодельованого часу було об'єктивно оцінено ефективність кожного з алгоритмів за строгими метриками: MSE, індексом структурної подібності (SSIM) та сукупними витратами енергії. Результати експериментів переконливо доводять, що алгоритм розумного локального спалахування забезпечує найкращий баланс між ідеальною якістю зображення (SSIM $\approx$ 1.0) та високою енергоефективністю. Запропонований метод зводить до мінімуму візуальне та когнітивне навантаження на користувача, що є критично важливим для фонових інформаційних пристроїв.

Ключові слова: E-Ink дисплей, електронні чорнила, електрофорез, часткове оновлення, візуальні артефакти, ghosting, програмне моделювання, оптимізація алгоритмів, SSIM, енергоефективність.

Radchenko K., Lutsenko B. Software modeling and optimization of partial refresh algorithms for E-Ink displays. The study investigates the fundamental problem of visual artifacts (ghosting) during the partial refresh of electrophoretic displays (E-Ink). To address this issue, a specialized software simulator was developed to mathematically model the processes of residual charge accumulation, microparticle inertia, and image degradation over time. Three screen refresh paradigms are proposed and investigated in detail: naive partial refresh (baseline without compensation), threshold-based full refresh relying on dynamic Mean Squared Error (MSE) calculation, and an innovative Smart Regional Flash algorithm focused on minimizing the inversion area. Through a continuous one-hour simulated clock timer, the performance of each algorithm was objectively assessed using rigorous metrics: MSE, Structural Similarity Index (SSIM), and cumulative energy consumption. Experimental results conclusively demonstrate that the Smart Regional Flash algorithm provides the optimal balance between ideal image quality (SSIM $\approx$ 1.0) and high energy efficiency. The proposed method minimizes visual and cognitive load for the user, which is critical for background informational devices.

Keywords: E-Ink display, electronic ink, electrophoresis, partial refresh, visual artifacts, ghosting, software modeling, algorithm optimization, SSIM, energy efficiency.

Постановка наукової проблеми. Сучасні інформаційні технології все частіше звертаються до концепції "спокійних" або фонових інтерфейсів (calm technology), де пристрої надають користувачеві інформацію без зайвого відволікання уваги. Технологія електронних чорнил (E-Ink), що базується на явищі мікрокапсульного електрофорезу, ідеально вписується в цю концепцію. Завдяки своїй унікальній бістабільності – здатності утримувати зображення без споживання електроенергії – та візуальним характеристикам, що імітують звичайний папір, E-Ink дисплеї стали стандартом для електронних книг і активно впроваджуються у сегмент розумних годинників, цінників та інформаційних панелей.

Однак, фундаментальні фізичні принципи роботи E-Ink матриць зумовлюють їхній головний недолік: надзвичайно низьку швидкість реакції та схильність до утворення візуальних артефактів, відомих у літературі як «привиди» (ghosting-ефект). Цей феномен пояснюється в'язкістю рідини всередині мікрокапсул та інерційністю пігментних частинок. Під час швидкого часткового оновлення (partial refresh), коли контролер намагається змінити стан лише окремої групи пікселів (наприклад, секундної стрілки або цифр на таймері), попереднє зображення не стирається повністю. Частинки не встигають зайняти ідеальні полюсні позиції, через що на екрані залишаються тіні попередніх кадрів. З кожним наступним циклом такого оновлення без компенсації, екран накопичує ці артефакти, втрачає контрастність, і зрештою текст стає нечитабельним.

Традиційним та найбільш радикальним методом боротьби з ghosting-ефектом є періодичне повне оновлення екрана (full refresh). Цей процес полягає в подачі інтенсивних знакозмінних імпульсів на всю матрицю: екран спочатку заливається чорним кольором, потім білим, і лише після цього формується нове зображення. Хоча це гарантує повне очищення мікрокапсул від залишкового заряду, такий підхід має три критичні недоліки: він займає багато часу (від 0.5 до 2 секунд), споживає максимальну кількість енергії та створює сильний візуальний подразник (миготіння). Для пристроїв, що стоять на робочому столі користувача і оновлюються щохвилини або щосекунди, постійне миготіння є неприпустимим. Отже, виникає актуальна науково-практична проблема: як знайти алгоритмічний баланс, що дозволить оновлювати динамічний контент на E-Ink екрані чисто, плавно і без застосування ресурсомісткого повного перемальовування.

Аналіз досліджень. Проблема оптимізації оновлення електрофоретичних дисплеїв привертає увагу багатьох дослідників та інженерів. Аналіз сучасної літератури показує, що більшість існуючих робіт сфокусовані на низькорівневому апаратному керуванні. Дослідники [1, 2] детально вивчають вплив форми керуючих сигналів напруги (waveforms) на швидкість переміщення частинок. Розробляються складні багаторівневі імпульси, що враховують температуру навколишнього середовища, попередній стан пікселя та час, що минув з останнього оновлення. Однак, ці розробки зазвичай патентуються виробниками матриць і залишаються закритими для широкого загалу розробників програмного забезпечення [3].

На вищому, програмному рівні, керування процесом оновлення часто зводиться до використання жорстко заданих евристичних правил. Наприклад, багато відкритих бібліотек для керування дисплеями пропонують виконувати повне оновлення після кожних N часткових (де N зазвичай варіюється від 5 до 10) [4]. Як показують дослідження [5], такий детермінований підхід є вкрай неефективним у реальних сценаріях. Ступінь деградації зображення нелінійно залежить від характеру контенту: оновлення дрібного тексту з високою просторовою частотою призводить до швидшого накопичення артефактів, ніж плавна зміна великих графічних блоків. Тому використання фіксованого лічильника N призводить або до надмірного енергоспоживання (якщо N мале), або до неприйнятної якості (якщо N велике).

Експериментальні дослідження безпосередньо на мікроконтролерах та фізичних матрицях пов'язані з низкою труднощів [6]. E-Ink екрани мають обмежений ресурс безперервного швидкого оновлення. Крім того, апаратне тестування не дає змоги автоматизовано отримувати точні кількісні метрики погіршення якості (ground truth) у режимі реального часу, оскільки для порівняння ідеального цифрового кадру з фізичним зображенням на екрані потрібна складна система зовнішнього оптичного захоплення з алгоритмами комп'ютерного зору. З огляду на ці обмеження, сучасна наука все частіше звертається до методів математичного та комп'ютерного моделювання [7]. Створення достовірної програмної моделі E-Ink дисплея відкриває можливості для швидкого прототипування, тестування та валідації нових алгоритмічних підходів без ризику пошкодження обладнання.

Мета дослідження. Основною метою даного дослідження є фундаментальне підвищення якості відображення динамічного контенту на E-Ink дисплеях зі збереженням їхньої високої енергоефективності. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання: по-перше, розробити математичну модель фізичних процесів деградації зображення; по-друге, розробити та оптимізувати програмні алгоритми часткового оновлення; по-третє, провести їхнє комплексне порівняльне тестування з використанням визнаних метрик якості зображення та оцінкою енерговитрат.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Фундаментом нашого дослідження виступає розроблена математична модель, яка формалізує процеси накопичення інерційної втоми та залишкового заряду в електрофоретичній матриці. Віртуальний простір дисплея моделюється як двовимірна матриця розміром $W \times H$, де W та H позначають ширину та висоту в пікселях відповідно. Кожному пікселю з координатами (x, y) у будь-який момент часу t зіставляється його фізичний стан $S_{(x,y)} \in [0.0, 1.0]$. У цій неперервній шкалі значення 1.0 відповідає максимальній відбивальній здатності (чисто білий колір), а 0.0 – максимальному поглинанню світла (повністю чорний колір). Проміжні значення відображають різні відтінки сірого, що виникають через неповне переміщення пігменту.

В основі проблеми ghosting-ефекту лежить фізичний опір середовища. Коли на капсулу подається напруга для зміни стану пікселя, чорні та білі частинки не просто міняються місцями миттєво; вони долають в'язке тертя. Якщо імпульс напруги є закоротким (як при частковому оновленні), частинки зупиняються на півшляху. Для моделювання цього явища ми вводимо поняття матриці накопиченого залишкового заряду Q . Початковий стан цієї матриці є нульовим.

При ініціації циклу часткового оновлення для певної прямокутної області (bounding box), контролер отримує ідеальну матрицю цільового стану $T_{(x,y)}$. Необхідна зміна стану, або дельта, розраховується як різниця між цільовим та поточним фізичним станом:

$$\Delta_{(x,y)} = T_{(x,y)} - S_{(x,y)}$$

У ідеальній системі піксель просто прийняв би значення $S + \Delta$. Однак у реальній фізичній системі ефективність цього переходу $E_{(x,y)}$ деградує залежно від того, наскільки "втомленим" є піксель. Ступінь цієї втоми $P_{(x,y)}$ визначається модулем накопиченого заряду та емпіричним коефіцієнтом примарності (ghosting factor, α), який характеризує фізичні властивості конкретного типу електронних чорнил:

$$P_{(x,y)} = |Q_{(x,y)}| \cdot \alpha$$

Відповідно, ефективність переміщення частинок стає обернено пропорційною до втоми, з нижньою межею (наприклад, 0.1), щоб запобігти повному "заморожуванню" пікселя в моделі:

$$E_{(x,y)} = \max(0.1, 1.0 - P_{(x,y)})$$

Таким чином, новий фізичний стан пікселя S' після завершення імпульсу часткового оновлення розраховується як:

$$S'_{(x,y)} = S_{(x,y)} + \Delta_{(x,y)} \cdot E_{(x,y)}$$

Кожна зміна стану залишає свій слід у матриці заряду. Ми моделюємо це як акумуляцію втоми Q' , яка зростає пропорційно до абсолютної величини виконаного переходу Δ та швидкості накопичення (charge accumulation rate, β):

$$Q'_{(x,y)} = Q_{(x,y)} + |\Delta_{(x,y)}| \cdot \beta$$

Саме це рівняння відповідає за поступове зниження контрастності: чим більше піксель змінює свій стан без повного скидання, тим більше зростає його Q , тим меншою стає ефективність E , і тим більшим стає розрив між бажаним T та реальним S' станом.

Для оцінки ефективності розроблених алгоритмів необхідно також моделювати енергетичні витрати. В електрофоретичних дисплеях енергія витрачається виключно на зміну стану. Тому енергія одного часткового оновлення пропорційна інтегральній сумі абсолютних змін станів усіх пікселів:

$$E_{\text{partial}} = \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} |\Delta_{(x,y)}|$$

У випадку ж повного глобального оновлення (full refresh), контролер спочатку інвертує весь екран у чорний, а потім у білий, змушуючи всі частинки пройти максимальний шлях незалежно від їхнього поточного стану. Енергетична вартість такої операції є колосальною і пропорційною до подвійної площі всього дисплея. Локальне спалахування (local clear) працює за схожим принципом, але обмежується лише прямокутною областю змін (bounding box), тому його вартість пропорційна подвійній площі цієї конкретної області.

Оперуючи цією математичною моделлю, ми розробили та дослідили три парадигми (алгоритми) керування оновленням:

1. **Алгоритм А (Наївний базовий підхід).** Алгоритм здійснює виключно часткові оновлення (відправляє дельту), повністю ігноруючи накопичення залишкового заряду. Цей алгоритм слугує нижньою межею якості (baseline) і демонструє природну поведінку дисплея без втручання.
2. **Алгоритм В (Порогове глобальне оновлення).** Алгоритм реалізує адаптивний підхід на основі контролю помилки. При кожному такті він обчислює середньоквадратичну помилку (MSE) між ідеальною матрицею T та фізичною S . Як тільки помилка перевищує заданий критичний поріг τ (наприклад, $\tau = 0.1$), алгоритм примусово зупиняє роботу і виконує повне глобальне очищення екрана. Це скидає матрицю Q до нуля і відновлює якість.

3. **Алгоритм С (Розумне локальне спалахування).** Замість того, щоб аналізувати екран загалом, цей алгоритм працює виключно з просторовими координатами змін (bounding box). Перед тим як вивести нові дані у цій зоні, алгоритм здійснює швидке локальне інвертування пікселів лише в межах цього прямокутника. Це локально скидає заряд Q до нуля, гарантуючи ідеальне нанесення нових пікселів, при цьому не зачіпаючи і не "мигаючи" рештою екрана.

Для комплексної перевірки ефективності алгоритмів було спроектовано сценарій інтенсивного навантаження – симуляцію роботи цифрового годинника-таймера. Протягом однієї години віртуального часу екран оновлювався щосекунди (загалом 3600 ітерацій). Такий сценарій є одним з найскладніших для E-Ink, оскільки оновлення відбувається часто, але на дуже малій площі екрана (лише цифри секунд та хвилин), що призводить до гіперлокалізованого накопичення артефактів. Зовнішній вигляд змодельованого годинника в процесі симуляції представлено на рис. 1. Оцінка результатів проводилася за трьома параметрами, динаміка яких представлена на рис. 2, 3 та 4.

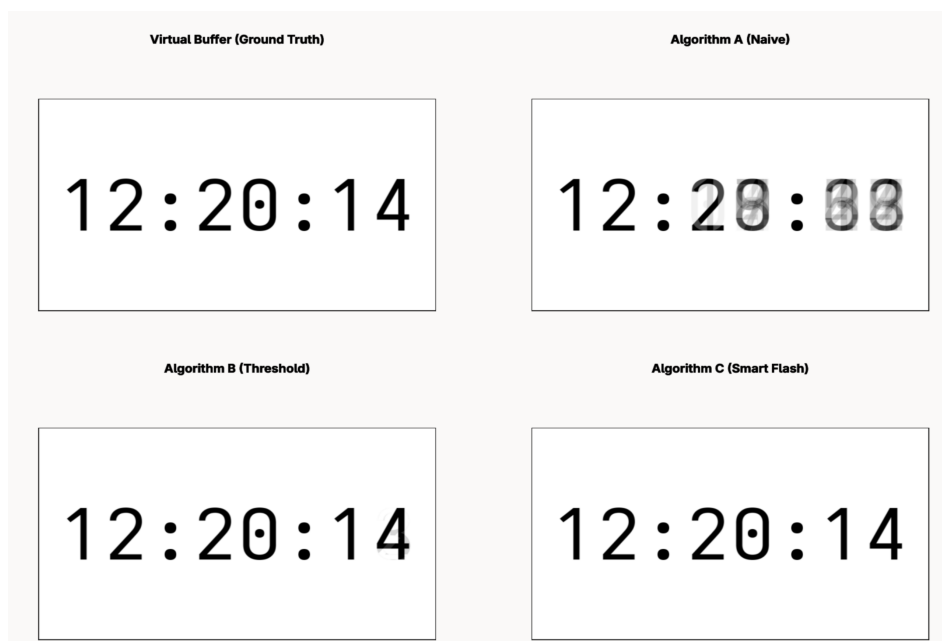


Рис. 1. Результат симуляції роботи цифрового годинника-таймера

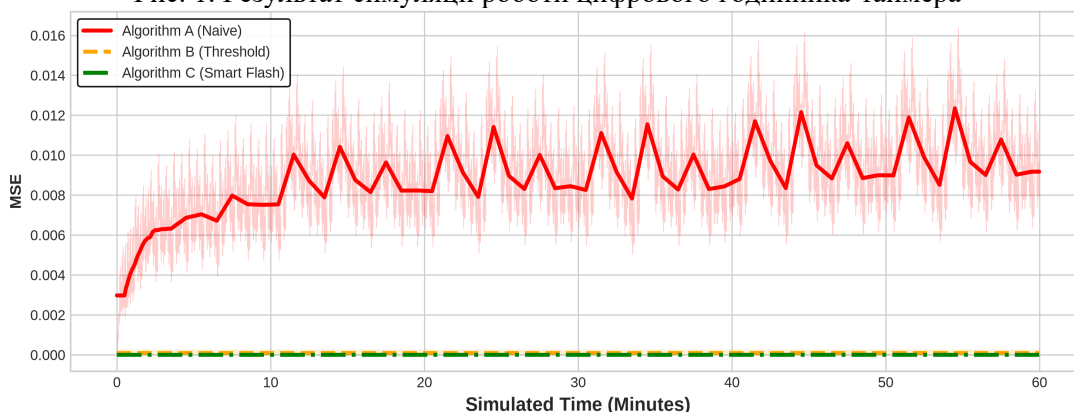


Рис. 2. Результати порівняння алгоритмів за MSE

Детальний аналіз графіка (рис. 2) середньоквадратичної помилки (MSE) демонструє класичну проблему наївного підходу (Алгоритм А). Помилка стрімко зростає вже на перших хвилинах симуляції і переходить у режим високоамплітудних пилкоподібних коливань у діапазоні від 0.008 до 0.012. Ці коливання пояснюються тим, що іноді зміна цифр частково перекриває старі артефакти, маскуючи їх, але загальний тренд залишається негативним. Натомість Алгоритми В і С

демонструють абсолютну стабільність – їхній рівень помилки візуально зливається з віссю абсцис, доводячи високу ефективність у боротьбі з артефактами.

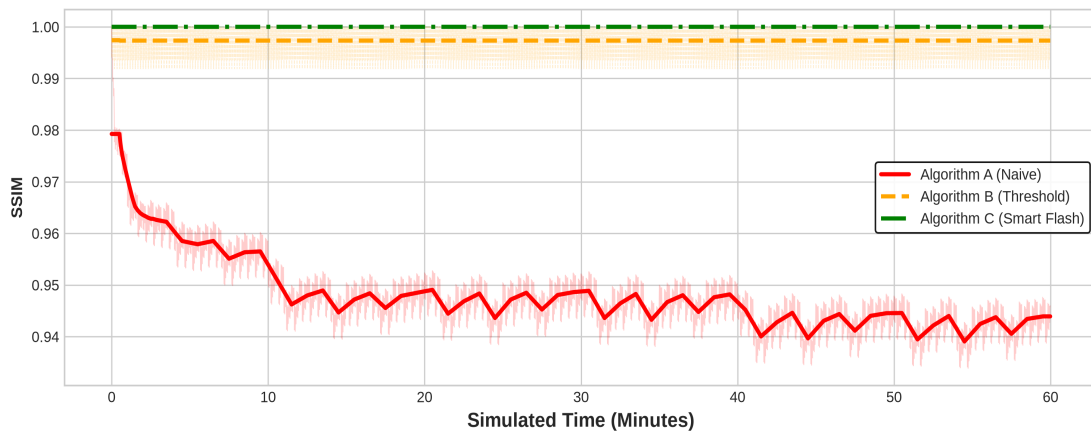


Рис. 3. Результати порівняння алгоритмів за SSIM

Проте MSE не завжди корелює з людським сприйняттям. Більш релевантною метрикою є індекс структурної подібності зображення (SSIM) [8], який оцінює зміну структури, яскравості та контрастності мікрорегіонів. Як видно з рис. 3, для Алгоритму А показник SSIM переживає падіння з 1.0 до 0.94 протягом перших 10 хвилин. У контексті візуалізації тексту SSIM = 0.94 означає втрату читабельності: контури літер стають розмитими, фон навколо них сіріє, погіршуючи якість відображення.

Алгоритм В утримує SSIM на високому рівні (близько 0.99), проте на графіку помітні регулярні мікропровали – це моменти безпосередньо перед спрацьовуванням порогу τ та ініціацією повного оновлення. Алгоритм С забезпечує бездоганну якість: SSIM стабільно дорівнює 1.0 без жодних флуктуацій.

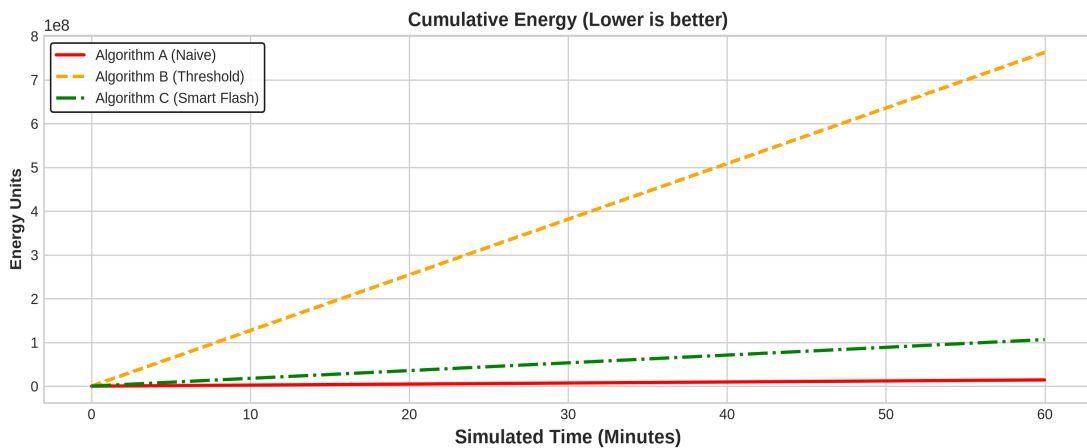


Рис. 4. Результати порівняння алгоритмів за кумулятивним енергоспоживанням

Ключовим фактором при виборі алгоритму для портативних пристроїв є графік кумулятивної енергії (рис. 4). Тут яскраво проявляється критичний недолік порогового Алгоритму В. Через постійне досягнення ліміту MSE в зоні годинника, контролер змушений щоразу оновлювати весь дисплей. Це призводить до стрімкого, крутого лінійного зростання енергоспоживання, що сягає майже $8 \cdot 10^8$ одиниць. У реальному пристрої це призведе до розрядки батареї за лічені дні замість місяців. Алгоритм С (Розумне локальне спалахування) вирішує цю проблему: його графік ледь відривається від графіка наївного підходу. Витрачаючи енергію виключно на очищення невеликого bounding box, Алгоритм С споживає майже у 8 разів менше енергії, ніж Алгоритм В, гарантуючи при цьому ідеальну візуальну якість.



Рис. 5. Вигляд симуляції гортання сторінок тексту

Дослідження сценарію посторінкового оновлення тексту. Для перевірки універсальності алгоритмів та їхньої поведінки під час масивних оновлень екрана було змодельовано сценарій електронної книги (рис. 5), де на екран виводиться масив тексту, який повністю замінюється новою сторінкою кожні 10 симульованих секунд. Цей сценарій докорінно відрізняється від годинника тим, що зона корисного оновлення (bounding box) займає переважну частину дисплея.

Результати симуляції наведені на рис. 6-8. Аналіз метрики структурної подібності (рис. 7) показує, що наївний алгоритм (Алгоритм А) не здатний впоратись із таким навантаженням: показник SSIM стрімко падає до критичної позначки 0.86, що на практиці означає перетворення фону на суцільний брудний градієнт із залишками старих літер, унеможливаючи подальше читання. Пороговий алгоритм В утримує якість у прийнятних межах (від 0.94 до 1.0), очищуючи екран у моменти спрацювання порогу. Алгоритм С, як і очікувалося, забезпечує бездоганну структурну подібність $SSIM = 1.0$ протягом усього експерименту.

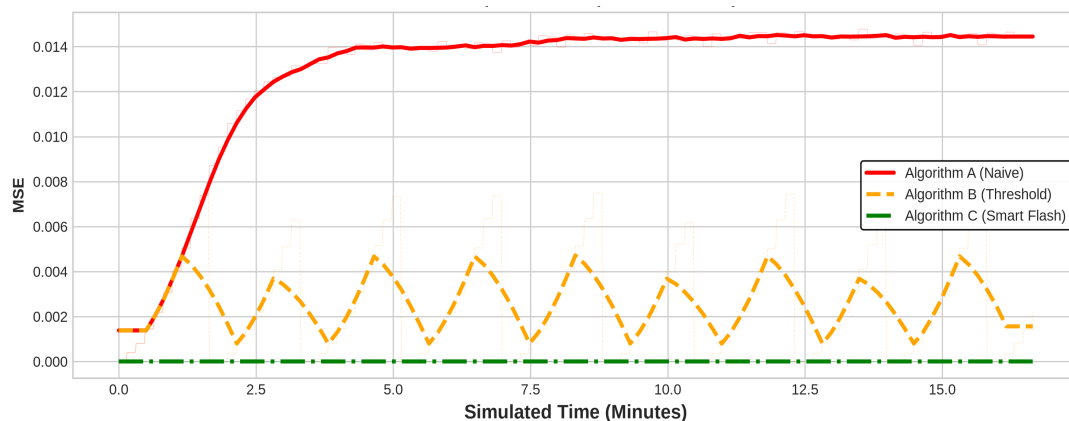


Рис. 6. Результати (читання) за метрикою MSE

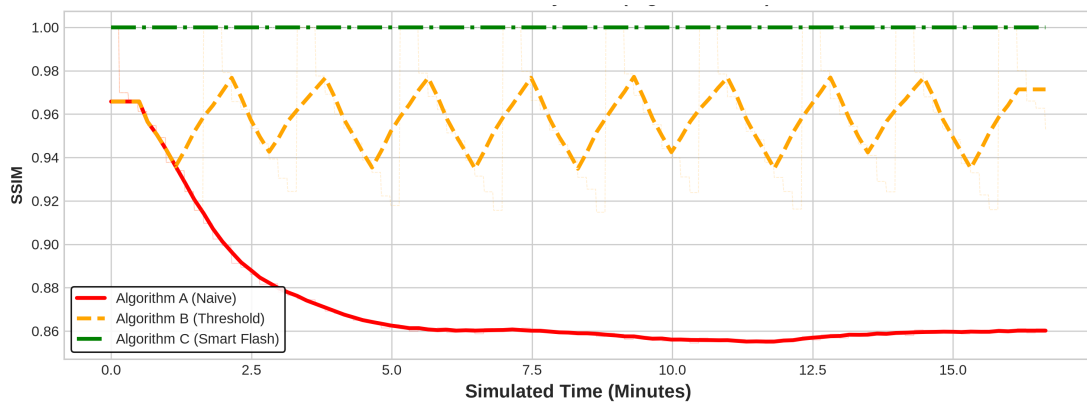


Рис. 7. Результати (читання) за індексом SSIM

Однак, ключовим відкриттям цієї частини дослідження є графік кумулятивної енергії (рис. 8). Оскільки текст займає майже весь екран, алгоритм розумного локального спалахування (Алгоритм С) змушений ініціювати подвійний інверсійний імпульс для всього масиву тексту при кожному перегортанні сторінки. Це призводить до катастрофічного, лінійного зростання енергоспоживання, що сягає понад $5 \cdot 10^7$ одиниць енергії. У той самий час, Алгоритм В чекає, поки рівень артефактів досягне порогу τ , і виконує повне очищення екрана значно рідше. Завдяки цьому Алгоритм В виявляється у ~ 5 разів економнішим за Алгоритм С у сценарії читання.

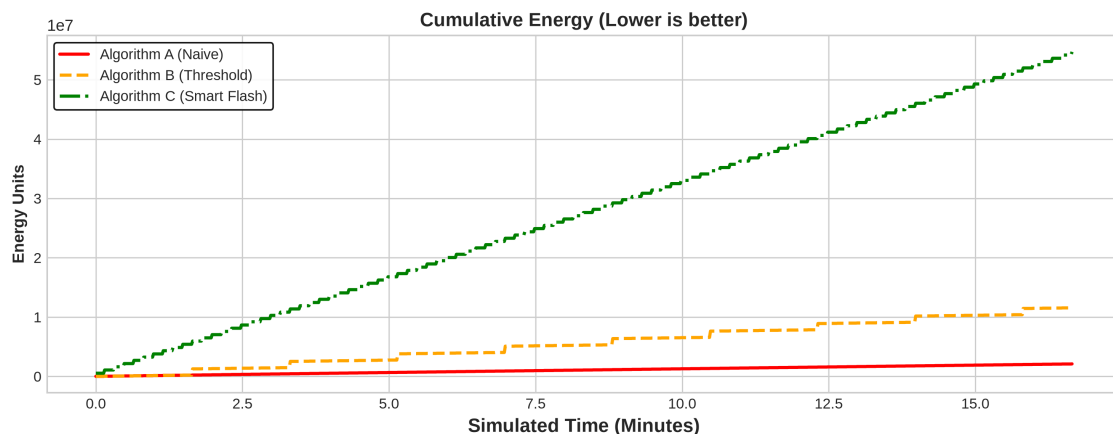


Рис. 8. Результати (читання) за кумулятивним енергоспоживанням

Висновки. Проведене дослідження докладно розкриває проблематику відображення динамічного контенту на електрофоретичних дисплеях. Показано, що традиційне використання некомпенсованого часткового оновлення (Алгоритм А) швидко призводить до деградації зображення і робить інформацію нечитабельною.

Отримані результати відкривають широкі можливості для подальшого покращення смарт-пристроїв на базі E-Ink технологій. Застосування локального скидання заряду дозволяє зберегти всі переваги бістабільності дисплея, мінімізуючи його головний недолік. Більше того, розроблений математичний апарат може бути використаний у майбутньому для створення гібридних алгоритмів, які б враховували не лише просторову координату зміни, але й градієнт накопиченого заряду для ще більш точного калібрування ефективності $E_{(x,y)}$.

Головним результатом роботи є виявлення чіткого інженерного компромісу (trade-off) між якістю зображення та енергоефективністю, що сильно залежить від просторової площі оновлення. Для **гіперлокалізованих динамічних інтерфейсів** (віджети, таймери, годинники, курсори) алгоритм розумного локального спалахування (Smart Regional Flash, Алгоритм С) довів свою абсолютну перевагу. Даний алгоритм обмежує зону інверсії маленьким bounding box, що повністю усуває проблему ghosting-ефекту при стабільно низькому енергоспоживанні. Для **масивних посторінкових оновлень** (читання книг, перегляд документів) Алгоритм С хоч і гарантує ідеальну якість ($SSIM = 1.0$), проте стає енергетично не виправданим. У випадках такого використання та в

умовах жорсткої економії заряду батареї, доцільно віддати перевагу пороговому адаптивному підходу (Алгоритм В), який є значно економнішим і забезпечує прийнятну для читання якість.

Впровадження гібридних драйверів, які б автоматично перемикали парадигми Алгоритмів В і С залежно від площі bounding box, є найперспективнішим шляхом для майбутнього розвитку E-Ink пристроїв.

Список бібліографічного опису

1. Kao Wen-Chung, Chang Wei-Te, Ye Jia-An (2012). Driving Waveform Design Based on Response Latency Analysis of Electrophoretic Displays // Journal of Display Technology. DOI: 10.1109/jdt.2012.2205896
2. Zhong Xiangjie, Zhao Xiaoyan, Zhao Tiesong (2026). Review on Image Preprocessing and Driving Waveform Design for Electrophoretic Displays // Journal of the Society for Information Display. DOI: 10.1002/jsid.70044
3. Kao Wen-Chung (2010). Electrophoretic Display Controller Integrated With Real-Time Halftoning and Partial Region Update // Journal of Display Technology. DOI: 10.1109/jdt.2009.2030774
4. Feng Guotong, Gormish Michael J. (2008). Ghosting Reduction Using Digital Halftoning for Electrophoretic Displays // SID Symposium Digest of Technical Papers. DOI: 10.1889/1.3069761
5. Yang Shang-Han, Lin Fang-Cheng, Huang Yi-Pai et al. (2012). Ghosting Reduction Driving Method in Electrophoretic Displays // SID Symposium Digest of Technical Papers. DOI: 10.1002/j.2168-0159.2012.tb06057.x
6. Heikenfeld J., Drzaic P., Yeo J.-S., Koch T. (2011). A critical review of the present and future prospects for electronic paper // Journal of the Society for Information Display 19(2):129-156. DOI: 10.1889/JSID19.2.129
7. Amundson Karl (2012). Electrophoretic Displays // Handbook of Visual Display Technology. DOI: 10.1007/978-3-540-79567-4_101
8. Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861

References

1. Kao Wen-Chung, Chang Wei-Te, Ye Jia-An (2012). Driving Waveform Design Based on Response Latency Analysis of Electrophoretic Displays // Journal of Display Technology. DOI: 10.1109/jdt.2012.2205896
2. Zhong Xiangjie, Zhao Xiaoyan, Zhao Tiesong (2026). Review on Image Preprocessing and Driving Waveform Design for Electrophoretic Displays // Journal of the Society for Information Display. DOI: 10.1002/jsid.70044
3. Kao Wen-Chung (2010). Electrophoretic Display Controller Integrated With Real-Time Halftoning and Partial Region Update // Journal of Display Technology. DOI: 10.1109/jdt.2009.2030774
4. Feng Guotong, Gormish Michael J. (2008). Ghosting Reduction Using Digital Halftoning for Electrophoretic Displays // SID Symposium Digest of Technical Papers. DOI: 10.1889/1.3069761
5. Yang Shang-Han, Lin Fang-Cheng, Huang Yi-Pai et al. (2012). Ghosting Reduction Driving Method in Electrophoretic Displays // SID Symposium Digest of Technical Papers. DOI: 10.1002/j.2168-0159.2012.tb06057.x
6. Heikenfeld J., Drzaic P., Yeo J.-S., Koch T. (2011). A critical review of the present and future prospects for electronic paper // Journal of the Society for Information Display 19(2):129-156. DOI: 10.1889/JSID19.2.129
7. Amundson Karl (2012). Electrophoretic Displays // Handbook of Visual Display Technology. DOI: 10.1007/978-3-540-79567-4_101
8. Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861

Історія статті:

Отримано: 12.05.2026 Доопрацьовано: 23.07.2026 Прийнято до друку: 23.09.2026 Опубліковано: 29.09.2026