

# ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА АПАРАТНА АРХІТЕКТУРА ДИСПЛЕЇВ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОННОГО ЧОРНИЛА (E-INK)

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

*У роботі розглядаються фізичні принципи функціонування дисплеїв на основі електронних чорнил (E-Ink), зокрема фундаментальне явище електрофорезу. Описано механізм просторового переміщення заряджених пігментних частинок у мікрокапсулах під дією зовнішнього електричного поля. Проведено математичні розрахунки напруженості керуючого поля та порівняльний аналіз енергоспоживання. Проаналізовано високу енергоефективність технології, яка досягається завдяки властивості бістабільності, та розглянуто багатопшарову архітектуру сучасних дисплеїв з точки зору оптимізації апаратного забезпечення.*

**Ключові слова:** електронні чорнила, E-Ink дисплей, електрофорез, електричне поле, бістабільність, енергоефективність, мікрокапсули.

## Abstract

*This paper examines the physical principles behind the operation of electronic ink (E-Ink) displays, specifically focusing on the fundamental phenomenon of electrophoresis. The mechanism of the spatial movement of charged pigment particles within microcapsules under the influence of an external electric field is described. The high energy efficiency of the technology is analyzed, achieved through the property of bistability. The mathematical justification of pixel control processes using an active matrix is provided, and the multilayer architecture of modern displays is discussed in terms of visual comfort and hardware optimization.*

**Keywords:** electronic ink, E-Ink display, electrophoresis, electric field, bistability, energy efficiency, microcapsules.

## Вступ

Проектування сучасних користувацьких інтерфейсів та оптимізація взаємодії людини з комп'ютером вимагають глибокого розуміння не лише програмної, але й апаратної складової пристроїв. Однією з головних проблем тривалого використання традиційних рідкокристалічних (LCD) та OLED дисплеїв є значне енергоспоживання для постійного оновлення кадрів, а також зорова втома користувача, викликана наскрізним випромінюванням світла від внутрішньої підсвітки прямо в очі [1]. Ефективним інженерним та фізичним розв'язанням цих проблем є технологія електронного чорнила (E-Ink).

На відміну від класичних екранів, панелі E-Ink не використовують світіння самих пікселів, а формують видиме зображення завдяки відбиттю зовнішнього освітлення, імітуючи оптичні властивості звичайного поліграфічного паперу. Метою цієї роботи є дослідження фундаментальних фізичних принципів, зокрема явища електрофорезу, що лежать в основі формування зображення, а також проведення практичних розрахунків для обґрунтування високої енергоефективності дисплеїв типу E-Ink.

## Мета роботи

Метою цієї роботи є дослідження фундаментальних фізичних принципів, зокрема явища електрофорезу, що лежать в основі формування зображення, а також проведення практичних математичних розрахунків для обґрунтування високої енергоефективності дисплеїв типу E-Ink.

## Матеріали та методи

Основним матеріалом для дослідження слугували технічні специфікації дисплеїв типу E-Ink та відкриті дані щодо їхньої апаратної архітектури. Під час виконання роботи було використано теоретико-аналітичний метод для опрацювання фізичної бази явища електрофорезу, а також метод математичного моделювання для формалізації дії зовнішнього електричного поля на заряджені пігменти (застосування закону Кулона та формул напруженості поля) і порівняльний аналіз для зіставлення енергоефективності технології E-Ink із традиційними LCD-матрицями.

## Результати дослідження

### Фізична природа технології: явище електрофорезу

Фундаментальною основою технології електронного паперу є електрофорез — спрямований рух дисперсних твердих частинок, завислих у рідкому середовищі, під дією зовнішнього електричного поля постійного струму [2].

Структурно монохромна панель E-Ink складається з мікрокапсул, діаметр яких становить близько 40-50 мікрометрів (що співмірно з товщиною людської волосини). Усередині кожної такої капсули міститься прозора діелектрична рідина з високим ступенем в'язкості, у якій у завислому стані знаходяться дисперсні пігментні гранули двох типів:

1. Білі частинки (зазвичай на основі діоксиду титану  $TiO_2$ ), які мають негативний електричний заряд.
2. Чорні частинки (технічний вуглець), які мають позитивний електричний заряд [3].

Керування контрастністю відбувається шляхом зміни полярності електричного поля на нижньому електроді активної матриці, що викликає відповідне просторове переміщення пігментних гранул всередині капсули (рис. 1).

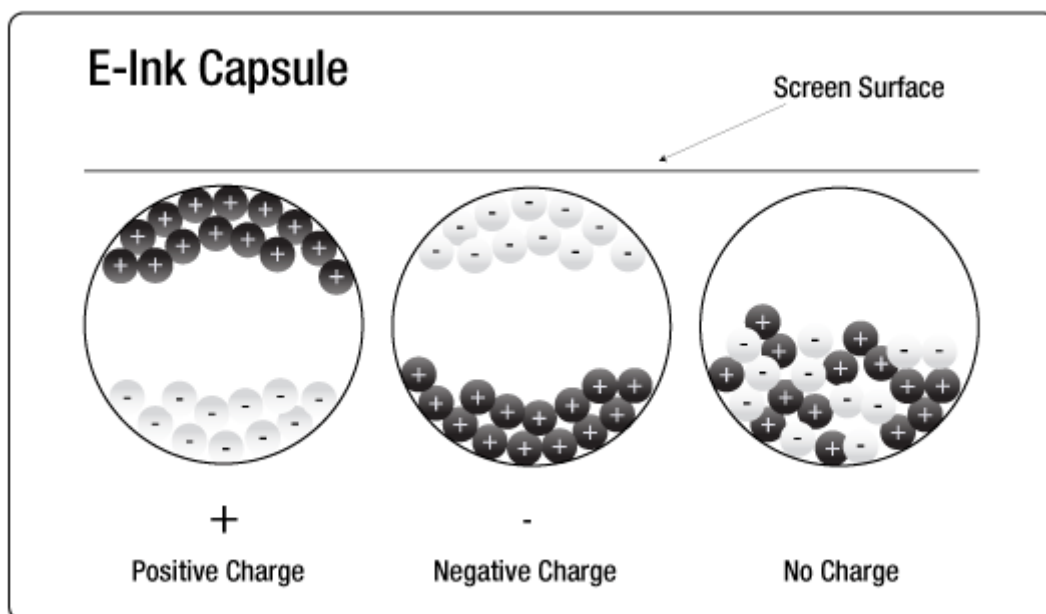


Рис. 1. Схема руху позитивно та негативно заряджених частинок у мікрокапсулі під дією електричного поля

Під шаром мікрокапсул розташована активна матриця (TFT-підкладка), яка генерує локальне електричне поле для кожної окремої капсули (пікселя). Керування контрастністю відбувається шляхом зміни полярності цього поля. Якщо матриця генерує негативний потенціал, позитивно заряджені білі частинки притягуються до верхнього прозорого електрода, відбиваючи світло і роблячи піксель білим. При подачі позитивного заряду догори піднімаються негативно заряджені чорні гранули, формуючи темну ділянку тексту.

## Математична модель динаміки частинок

Математична модель динаміки частинок та розрахунок поля

Процес формування зображення базується на законах електростатики. Між нижнім електродним шаром та верхнім прозорим електродом створюється електричне поле. Напруженість цього поля  $E$  визначається різницею потенціалів:

$$E = \frac{U}{d}$$

де  $U$  — напруга, прикладена до електродів;  $d$  — відстань між електродами (товщина шару мікрокапсул).

Для типового дисплея E-Ink товщина мікрокапсули становить  $d = 40$  мкм ( $40 \cdot 10^{-6}$  м), а стандартна керуюча напруга  $U = 15$  В. Виконаємо розрахунок напруженості електричного поля всередині пікселя:

$$E = \frac{15}{40 \times 10^{-6}} = 3,75 \times 10^5 \text{ В/м}$$

На кожен заряджену гранулу в цьому полі діє електростатична сила Кулона  $F_e$ , що змушує її рухатися:

$$F_e = q \cdot E$$

де  $q$  — електричний заряд окремої пігментної частинки. Рух частинок не є рівноприскореним, оскільки вони переміщуються у в'язкому середовищі, де на них діє сила гідродинамічного опору Стокса  $F_d = 6\pi\eta r v$ . Рівновага цих сил визначає стабільну швидкість дрейфу частинок і час відгуку дисплея [4].

## Багатшарова архітектура та формування кольорового зображення

Сучасні дисплеї електронного чорнила еволюціонували від монохромних рішень до складних багатшарових структур, здатних відтворювати кольорове зображення (наприклад, технологія E-Ink Kaleido). Фізична архітектура такої панелі включає базову монохромну капсульну плівку, над якою прецизійно розміщено масив кольорових світлофільтрів (Color Filter Array — CFA), що забезпечує правильне відбиття світлового потоку (рис. 2).

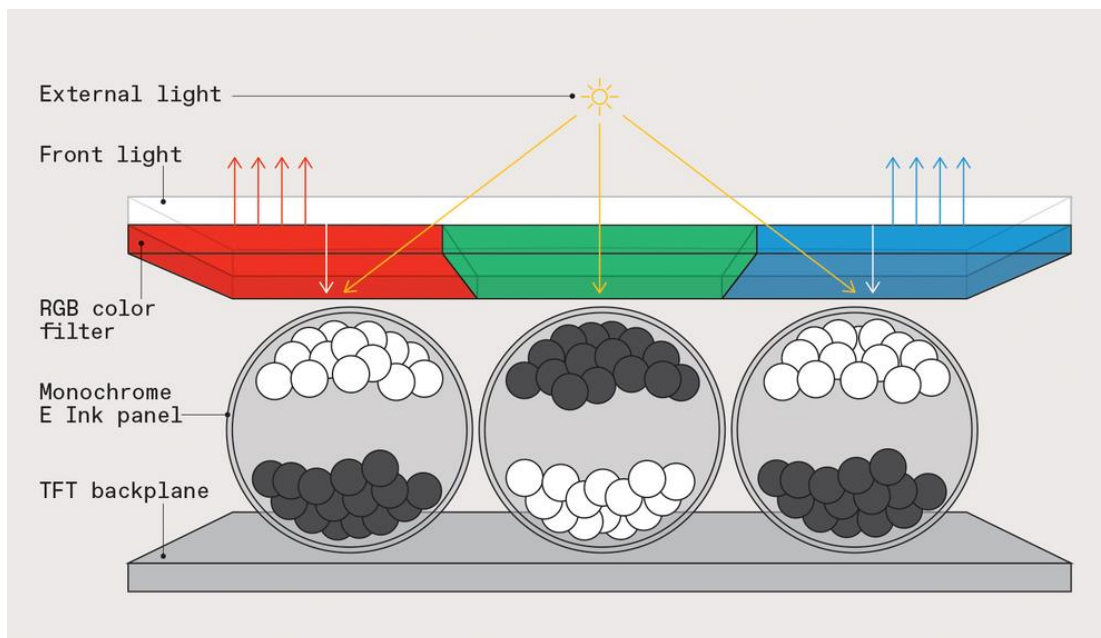


Рис. 2. Багатшарова будова кольорової панелі E-Ink: принцип відбиття зовнішнього світла крізь RGB-фільтр

Зовнішнє світло проходить крізь червоні, зелені та сині (RGB) субпікселі фільтра, досягає мікрокапсул і відбивається від білих частинок назад. Якщо під певним кольоровим фільтром піднято

чорні частинки, світло поглинається і колір не відображається. Завдяки комбінації відбитого світла через різні фільтри формується повноцінне кольорове зображення [5].

### Бістабільність як основа енергоефективності

Найважливішою перевагою E-Ink є бістабільність — здатність системи зберігати один із двох стабільних станів без зовнішнього впливу ( $E = 0$ ). Пристрій витрачає енергію виключно на подолання сили в'язкого тертя у момент перегортання сторінки.

Для наочності проведемо порівняльний розрахунок витрат енергії ( $W$ ) за 1 годину читання електронної книги на базі E-Ink та планшета на базі LCD.

- LCD-екран має постійне фонове підсвічування і споживає в середньому  $P = 2$  Вт. Робота за 1 годину (3600 с) становитиме:  $W_{LCD} = P \times t = 2 \times 3600 = 7200$  Дж
- E-Ink екран споживає енергію (близько  $P = 1,5$  Вт) лише під час оновлення зображення, що триває близько  $t = 0,5$  с. Якщо користувач читає зі швидкістю 1 сторінка на хвилину (60 оновлень за годину), витрачена енергія становитиме:  $W_{E-Ink} = 1,5 \text{ Вт} \times 0,5 \text{ с} \times 60 = 45$  Дж

### Висновки

Проведене дослідження доводить, що технологія E-Ink є еталонним прикладом застосування електростатики в апаратному забезпеченні. Виконані фізичні розрахунки показали, що для переміщення пігментів у мікрокапсулі розміром 40 мкм генерується потужне локальне електричне поле напруженістю  $3,75 \cdot 10^5$  В/м. Головна перевага технології — властивість бістабільності, підтверджена інженерними розрахунками. Математично доведено, що за стандартних умов експлуатації дисплей E-Ink споживає лише 45 Дж енергії на годину проти 7200 Дж у традиційних LCD-екранів. Тобто електронне чорнило є у 160 разів енергоефективнішим, що робить його безальтернативним рішенням для автономних пристроїв.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електронний папір [Електронний ресурс] // Вікіпедія – вільна енциклопедія. – : [https://uk.wikipedia.org/wiki/Електронний\\_папір](https://uk.wikipedia.org/wiki/Електронний_папір)
2. Електрофорез [Електронний ресурс] // Вікіпедія – вільна енциклопедія. : <http://uk.wikipedia.org/wiki/Електрофорез>
3. Що таке електронні чорнила або технологія E-Ink [Електронний ресурс] // Pocketbook. : <https://pocketbook.ua/news/chto-takoe-elektronnye-chernila>
4. How E-Ink works: Electrophoretic display technology [Електронний ресурс] // E-Ink Corporation Official Website. : [https://www.eink.com/tech/detail/How\\_it\\_works](https://www.eink.com/tech/detail/How_it_works)
5. Color E-Ink Technology Overview [Електронний ресурс] // E-Ink Corporation. : <https://www.eink.com/color-technology.html>

**Нечипорук Софія** – студентка групи 2PI-25б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [sonaneciporuk@gmail.com](mailto:sonaneciporuk@gmail.com)

**Науковий керівник: Мартинюк Володимир Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Nechyporuk Sofia** – student of group 2PI-25b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [sonaneciporuk@gmail.com](mailto:sonaneciporuk@gmail.com)

**Supervisor: Martyniuk Volodymyr V.** – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the General Physics Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia