АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВІДОБРАЖЕННЯ АВІАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА ЇХНЯ РЕАЛІЗАЦІЯ ЯК СИСТЕМИ НА КРИСТАЛІ

Віталій Карягін, аспірант, Роман Дунець, д.т.н, проф.,
Національний університет «Львівська політехніка», Україна,
e-mail: vitalii.o.kariahin@lpnu.ua, roman.b.dunets@lpnu.ua
https://doi.org/10.23939/istcmtm2025.01.055

Анотація.

Ця робота аналізує авіаційні системи відображення інформації, розглядаючи їхній розвиток, класифікацію та реалізацію у вигляді системи на кристалі (SoC). Досліджуються технології відображення, оцінюється їхня придатність для використання у цивільній та військовій авіації. Розглядається класифікація дисплеїв за типом відображуваної інформації, розташуванням і технологією дисплеїв, створюючи основу для розуміння їхніх функцій. Також розглядаються архітектурні підходи побудови систем авіоніки, з акцентом на переваги реалізації SoC. Дослідження підкреслює переваги блоків обробки зображень на основі SoC у підвищенні ефективності, зниженні енергоспоживання та покращенні ситуаційної обізнаності. Обговорюються виклики, зокрема обчислювальні вимоги та складність інтеграції. Отримані результати сприяють розвитку технологій авіаційних дисплеїв, підтримуючи створення більш адаптивних і високотехнологічних авіаційних систем.

Ключові слова: системи відображення авіаційної інформації, індикатор на лобовому склі, нашоломні системи індикації, індикатори панелі приладів, система на кристалі, SoC, системи авіоніки, архітектура систем авіоніки.

1. Вступ

Системи електронної індикації є невід'ємною складовою забезпечення безпечної експлуатації повітряних суден як у цивільній, так і у військовій авіації. Вони надають візуальне відображення критично важливих даних із бортових датчиків та систем, забезпечуючи пілота основною польотною інформацією, навігаційними даними, параметрами роботи двигунів та попереджувальними сигналами. Військові пілоти мають доступ до ще ширшого спектру даних, зокрема інфрачервоних зображень, радіолокаційної інформації, тактичних даних місії, параметрів наведення озброєння та попереджень про загрози. Комплексне та оперативне візуальне відображення стану повітряного судна і його навколишнього середовища є критично важливим для успішного виконання польоту та місії. Пілоти здатні швидко сприймати та обробляти значні обсяги візуальної інформації [1], але вкрай важливо, щоб подання даних було зрозумілим, а несуттєва інформація відфільтрована для зниження когнітивного навантаження в умовах високої робочої інтенсивності. Протягом останніх років відбулося чимало вдосконалень у взаємодії пілота з системами електронної індикації, і цей процес триває завдяки появі нових технологій та компонентів. Прикладами таких інновацій є індикатори на лобовому склі (HUD), нашоломні системи індикації (HMD) та багатофункціональні кольорові індикатори (MFD), які покликані підвищити ситуаційну обізнаність пілота та покращити процес прийняття рішень.

2. Недоліки

Системи електронної індикації та їх реалізація на базі SoC мають низку недоліків. Високі обчислювальні вимоги для рендерингу в реальному часі необхідно збалансувати з енергоефективністю, тоді як інтеграція з сучасними системи авіоніки ускладнюється через сумісність протоколів. Технології відображення також мають обмеження: LCD-дисплеї погано читаються при яскравому освітленні, OLED мають короткий термін служби, а DLP дисплеї генерують значну кількість тепла. Багато систем індикації є громіздкими, що робить вагу та габарити особливо критичними для військової авіації. Додатковими викликами залишаються енергоспоживання, тепловідведення та висока вартість. Використання SoC зменшує апаратну надлишковість, що сприяє зниженню маси, забезпечуючи водночас високу обчислювальну потужність. Однак їхня інтеграція в системи авіоніки ускладнює програмне забезпечення та створює виклики щодо забезпечення надійності.

3. Мета

Метою даної статті є дослідження та розробка архітектури системи на кристалі (SoC), яка дозволить удосконалити системи електронної індикації шляхом зменшення апаратної надлишковості та оптимізації ваги й габаритів. У межах цього дослідження буде проаналізовано еволюцію технологій відображення, розглянуто різні методи класифікації систем електронної індикації та досліджено розвиток архітектур

авіоніки. Це дозволить продемонструвати доцільність і потенційні переваги підходу, заснованого на SoC. Завдяки інтеграції та підвищеній ефективності, які забезпечують SoC, це дослідження сприятиме розробці більш адаптивних і високотехнологічних авіаційних систем індикації. Очікується, що такі системи покращать ситуаційну обізнаність пілотів, підвищать продуктивність систем і загальну безпеку та ефективність експлуатації.

4. Системи електронної індикації: методи, технології, архітектури та реалізація на базі SoC

4.1 Методи, що застосовуються в системах електронної індикації

Системи електронної індикації забезпечують візуальний інтерфейс між пілотом і бортовими системами повітряного судна. Основними методами індикації є індикатори на лобовому склі (HUD), нашоломні системи індикації (HMD) та індикатори панелі приладів (HDD). HUD та HMD відображають критично важливу інформацію про політ та місію безпосередньо в полі зору пілота — на лобовому склі або у візорі шолома. Натомість індикатори панелі приладів розташовані на інструментальній панелі літака, і для їх перегляду пілот має відвести погляд від зовнішнього середовища. Ці методи індикації спрямовані на підвищення ситуаційної обізнаності пілота, мінімізуючи необхідність перемикання уваги між зовнішнім середовищем і панеллю приладів [2]. Системи електронної індикації можна класифікувати за такими критеріями (рис. 1):

- тип відображуваної інформації
- фізичне розташування індикатора
- технологія відображення

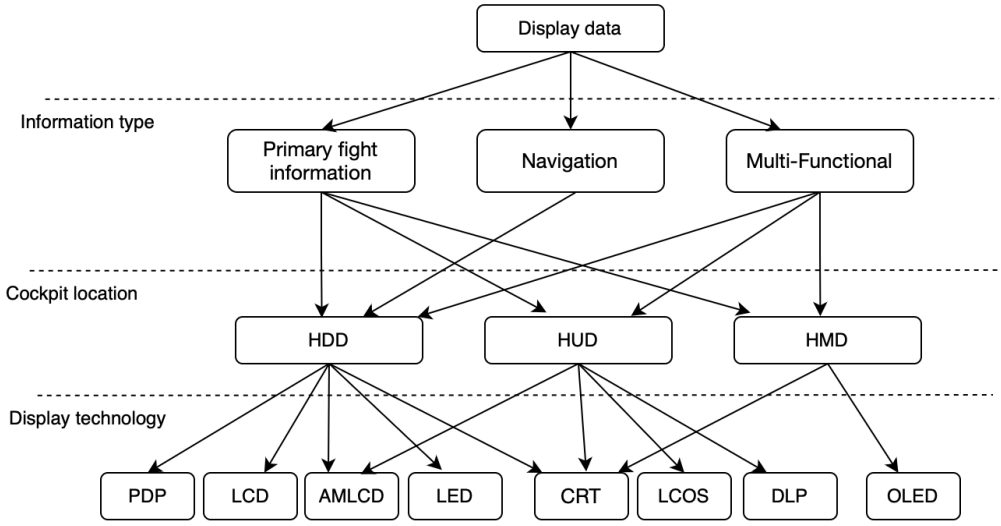

Рис.1. Класифікація систем електронної індикації.

Тип відображуваної інформації. Пілотажний дисплей замінює шість традиційних електромеханічних приладів: висотомір, авіагоризонт, покажчик повітряної швидкості, варіометр, покажчик крену та ковзання, а також індикатор курсу. Індикатори навігаційної інформації відображають положення повітряного судна у просторі, включаючи поточну позицію, курс, шлях і відхилення від запланованого маршруту. Ця інформація є критично важливою для підтримання ситуаційної обізнаності пілота та ефективного керування повітряним судном до пункту призначення. Багатофункціональні індикатори здатні відображати широкий спектр даних про стан повітряного судна, включаючи параметри роботи двигуна, інформацію про зв'язок та критично важливі дані місії. Крім того, ці дисплеї можуть виконувати функції пілотажних дисплеїв та навігаційних індикаторів, забезпечуючи пілотів комплексним візуальним інтерфейсом для моніторингу та керування різними системами та процесами повітряного судна.

Фізичне розташування індикатора. HUD та HDD мають статичне розташування і закріплені у корпусі повітряного судна. Натомість нашоломні системи індикації (HDM) рухаються разом із орієнтацією голови пілота, що дозволяє візуальній інформації постійно залишатися в межах поля зору пілота.

Технологія відображення. Технологія відображення зазнала значних удосконалень останнім часом, що дозволило розробити більш потужні та гнучкі системи електронної індикації. Традиційно, для відображення інформації в кабіні пілота використовувалися електронно-променеві трубки або механічні прилади, які мали обмежену функціональність. Нові технології відображення відкрили нові можливості для проектування інструментальних панелей.

4.2. Технології відображення, що використовуються в системах електронної індикації

Різні технології відображення використовуються в системах індикації на лобовому склі (HUD) і нашоломних системах індикації (HMD), кожна з яких має свої унікальні переваги та недоліки. Електронно-променеві трубки (CRT) були одними з перших технологій формування зображення, використаних у системах індикації на лобовому склі, забезпечуючи високу яскравість і контрастність. Проте вони мали обмеження за розмірами, вагою та високим споживанням енергії, що сприяло впровадженню нових, більш ефективних технологій відображення. З розвитком технологій відображення з'явилися нові типи дисплеїв, що відкривають нові можливості для систем електронної індикації. Рідкокристалічні дисплеї (LCD) стали популярними завдяки своїм компактним розмірам, низькому рівню споживання енергії та прийнятній роздільній здатності. Однак їх обмежена яскравість і контрастність можуть бути проблемою в умовах яскравого сонячного світла. Висока яскравість і контрастність є особливо критичними для HUD і HMD, де дисплеї можуть знаходитись у дуже яскравому навколишньому середовищі. Органічні світлодіоди (OLED) мають вищий коефіцієнт контрастності та яскравості порівняно з рідкокристалічними дисплеями. Проте OLED-дисплеї мають менший термін служби порівняно з CRT-дисплеями, хоча вони все ще не забезпечують таку ж яскравість. Така технологія відображення підходить для використання в HDD і HMD. Рідкокристалічний дисплей з активною матрицею (AMLCD), забезпечують покращену якість зображення, швидкий час відгуку і вищу роздільну здатність порівняно з пасивними матричними рідкокристалічними дисплеями. Рідкокристалічні дисплеї на кремнії (LCoS) мають кілька переваг для використання в системах індикації на лобовому склі, таких як висока роздільна здатність, хороший контраст і компактний розмір, що робить їх ідеальними для сучасних застосувань HUD і HMD. Проте дисплеї з використанням технології LCoS можуть страждати від ефекту збереження зображень, що може бути мінусом у деяких ситуаціях. Дисплеї з використанням DLP відомі високою яскравістю, відмінним контрастом і гарною точністю кольорів. Ці технології використовують цифрові мікрозеркала, що точно контролюють відбиття світла для створення необхідного зображення. DLP-дисплеї відзначаються високою яскравістю і широким динамічним діапазоном, що робить їх відмінним вибором для застосування в HUD і HMD, які працюють в яскравих умовах навколишнього освітлення. Однак потенційним недоліком DLP-дисплеїв є те, що вони генерують значне тепло під час роботи, що може вимагати додаткових систем охолодження або проектних рішень для підтримки продуктивності і надійності дисплея в обмежених умовах кабіни літака. Вибір відповідної технології відображення для HUD і HMD вимагає ретельного оцінювання таких факторів, як вартість, вага, споживана потужність, роздільна здатність, яскравість і контрастність, щоб відповідати специфічним вимогам і обмеженням платформи повітряного судна. Крім того, обрана технологія повинна мати низькі вимоги до обслуговування, щоб мінімізувати час простою та забезпечити надійну експлуатацію.

4.3. Типи архітектур авіоніки

Сучасний стан розвитку авіації включає такі архітектури авіоніки:

- розподілена архітектура;
- федеративна архітектура;
- інтегрована модульна архітектура.

На ранніх етапах розвитку авіоніки домінувала розподілена архітектура, яка передбачала автономні, самостійно працюючі системи та прилади, кожен з яких виконував певні локалізовані функції. Такий підхід дозволяє створювати модульні та гнучкі конструкції, де окремі компоненти можна було легко змінювати чи оновлювати без впливу на всю систему. Однак це також призводило до збільшення складності та надмірності, оскільки кожна система вимагала власного апаратного та програмного забезпечення.

Федеративна архітектура є наступним етапом розвитку після розподіленої моделі, де автономні системи об'єднуються для зменшення кількості окремих вузлів обробки даних. Цей підхід включає концентраційний вузол, який збирає дані з датчиків, і центральні комп'ютери, які обробляють сигнали та надають інформацію для систем літака, що використовують ці дані для виконання польотних функцій. Така централізована система дозволила спростити архітектуру авіоніки та зменшити загальну складність системи, покращивши ефективність і знизивши вимоги до обслуговування.
Інтегрована модульна архітектура авіоніки (IMA) долає обмеження федеративного підходу. Вона використовує відкриту мережеву архітектуру та спільну апаратну платформу, що забезпечує більшу гнучкість для модифікацій і оновлень. Функції літака виконуються через програмні додатки, що виконуються у операційній системі реального часу та спільну обчислювальну платформу, що дозволяє більш ефективно використовувати ресурси та полегшує інтеграцію нових можливостей. Такий підхід дозволяє розробляти більш сучасні та адаптивні системи електронної індикації, такі як системи індикації на лобовому склі та нашоломні системи індикації, які краще відповідають зростаючим вимогам як у цивільній, так і в військовій авіації.

4.4 Реалізація блоку обробки відображення як системи на кристалі.

Історично, системи авіаційних дисплеїв покладалися на спеціалізовані блоки обробки сигналів та генерацію зображень. Конкретні обчислювальні вимоги різняться залежно від типу дисплея, а також від обсягу та складності інформації, що відображається. Наприклад, індикатори панелі приладів зазвичай мають менші вимоги до рендерингу, орієнтуючись на відображення навігаційної, польотної та системної інформації. У свою чергу, більш складні системи відображення, такі як нашоломні дисплеї, вимагають додаткових можливостей для інтеграції в реальному часі динамічних даних про політ, дані з сенсорів та іншу інформацію. Завдяки прогресу в технологіях напівпровідників тепер можливо інтегрувати функції обробки відображення безпосередньо в систему на кристалі (SoC), використовуючи відкриту мережеву архітектуру інтегрованої модульної авіоніки. Це дозволяє створити більш компактне, енергоефективне та економічно вигідне рішення для сучасних авіаційних застосувань

Для простого індикатора панелі приладів, який може відображати основні польотні дані, показники двигуна та систем, базову навігацію, блок обробки відображення можна реалізувати як систему на кристалі з одношинною структурою, така система здатна виконувати генерацію зображень отриманих з бортової шини даних, що наведено на рис. 2.

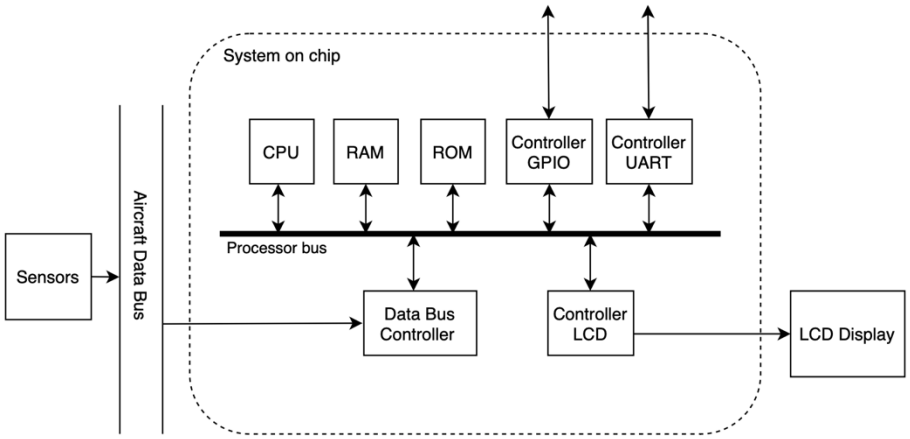

Рис. 2. Одношинна система на кристалі.

Для отримання основної польотної інформації від сенсорів та інших систем літака, блок обробки зображення має контролер шини даних, який обробляє протоколи даних авіоніки (ARINC 429, CAN, MIL-STD-1553) [4][9]. Крім того, блок обробки зображення включає стандартні контролери такі як, UART і GPIO, які можуть використовуватись як входи для керування кнопками або для окремої панелі управління.

Програма зберігається в постійній пам'яті (ROM), а дані зберігаються в оперативній пам'яті (RAM). Центральний процесор (CPU) виконує обчислення, компонування та форматування візуальної інформації на основі даних від сенсорів, систем і керуючих входів. Дизайн такої системи на кристалі з має обмежені можливості, за рахунок обмеженої кількості елементів, зазвичай до 5-7, що під’єднані до

системної шини. Проте він ефективно відповідає вимогам що задовільняють базові потреби простого індикатора панелі приладів. Для більш складних систем, таких як індикатор на лобомому склі, який також підтримує дублювання інформації на дисплей панелі приладів, архітектурна складність блоку обробки зображення збільшується для забезпечення вимог обчислень та більшої кількості вхідних даних. У таких випадках двошинна система на кристалі [10] буде кращим рішенням, як показано на малюнку 3. Вона має більшу продуктивність для обробки даних та виводу інформації для двох дисплеїв.

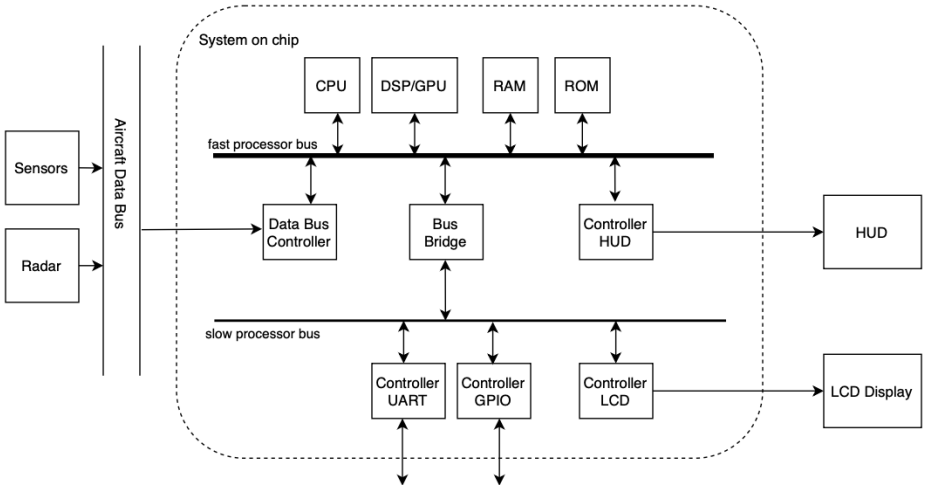

Рис. 3. Двошинна система на кристалі.

Двошинна система на кристалі для обробки зображень містить швидку процесорну шину, до якої, окрім процесора та пам'яті (RAM і ROM), підключені контролер HUD і блок цифрової обробки сигналів (DSP). Блок обробки зображень також отримує дані з радара та сенсорів літака. Друга шина (повільна процесорна шина) використовується для UART, GPIO і контролера LCD. Завдяки двошинній архітектурі система здатна ефективно обробляти значні обсяги інформації. Доданий блок DSP забезпечує швидке формування зображень для HUD, інтеграцію сенсорних даних і комбінування інформації для одночасного відображення на дисплеї HUD і головному дисплеї.

Для ще більш складних систем відображення, що мають більше вхідних джерел, вимоги до об'єднання даних та розширені можливості формування зображення, архітектура блока обробки зображень може бути удосконалена шляхом використання багатошинних топологій та співпроцесорів GPU або DSP, як показано на Рис. 4.

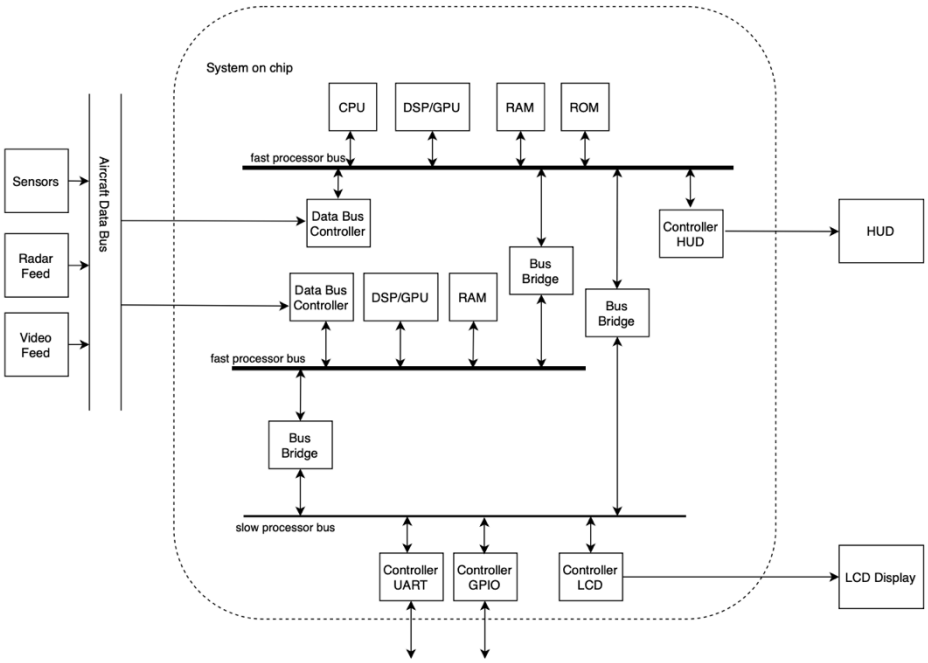

Рис. 4. Тришинна система на кристалі.

Система відображення інформації, що побудована на базі SoC з трьома шинами, передбачає наявність трьох процесорів CPU та двох DSP/GPU зі своїми окремими шинами даних. Дві високошвидкісні шини виділені для паралельної обробки даних сенсорів та генерування складної символіки на пілотажному дисплеї, тоді як повільна периферійна шина керує функціями управління та інтерфейсу. Використання спеціалізованого графічного процесора (GPU) або цифрового сигнального процесора (DSP) дозволяє блоку обробки зображень ефективно справлятися з підвищеним обсягом обчислень, забезпечувати роботу в реальному часі та реалізовувати розширені можливості візуалізації. Ці архітектурні вдосконалення, стали можливими завдяки використанню інтегрованої модульної архітектури авіоніки.

4.5 Аналіз запропонованих архітектурних рішень системи на кристалі

Одношинна система на кристалі може бути використана для реалізації простих систем електронної індикації, які зазвичай виконуються у вигляді пілотажних дисплеїв і забезпечують відображення основної польотної інформації. Електронні системи індикації, які відображають базові польотні дані, такі як навігація, експлуатаційні параметри літака та інформація про системи, широко використовуються у різних авіаційних платформах [4]. Такі базові системи інтегруються в експериментальні, загальної авіації, комерційні та військові літаки, відіграючи важливу роль у наданні пілотам критично важливої польотної інформації, необхідної для підтримання безпеки та ефективності польотів.

Двошинна система на кристалі добре підходить для систем відображення із підвищеними графічними вимогами. Інтеграція спеціалізованого графічного процесора або цифрового сигнального процесора забезпечує генерацію складнішої символіки, відображення кількох потоків даних та інтеграцію вхідних сигналів від сенсорів. Такі вдосконалені системи відображення широко застосовуються у багатофункціональних дисплеях та можуть бути використані як у комерційній, так і у військовій авіації для підтримки зростаючих потреб обчислень.

Тришинна система на кристалі, завдяки виділеним високошвидкісним шинам для об'єднання даних із сенсорів та рендерингу, у поєднанні з графічним або цифровим сигнальним процесором, дозволяє створювати найсучасніші системи відображення в кабіні пілотів. Використання окремих високошвидкісних шин підвищує ефективність паралельної обробки даних та дає змогу інтегрувати складні алгоритми об’єднання даних і розширені можливості візуалізації. Такий архітектурний підхід забезпечує необхідну обчислювальну потужність і гнучкість для роботи, що є критично важливим для підвищення рівня безпеки польотів і ефективності як у цивільній, так і у військовій авіації.

5. Висновки

У статті проведено комплексний аналіз і класифікацію методів, що застосовуються в системах відображення інформації, з акцентом на їхню ключову роль у забезпеченні авіаційної безпеки та ефективності. Розглянуто технологічну еволюцію цих систем і її вплив на цивільну та військову авіацію. Дослідження висвітлює розвиток технологій дисплеїв, зокрема перехід від електро-променевих трубок (CRT) до LCD, AMLCD, OLED і DLP, а також аналізує їхні переваги та недоліки. Окремо розглянуто класифікацію систем електронної індикації, за типом інформації, фізичним розташуванням та технологією відображення. Крім того, у статті досліджуються вдосконалення авіоніки, зокрема інтеграція блоків обробки зображення як систем на кристалі. Запропоновано три варіанти реалізації архітектури блока обробки зображення: одношинна система на кристалі для простих дисплеїв індикації, двошинна система для більш розвинених систем, таких як пілотажні дисплеї та дисплеї навігації. Тришинна система на кристалі для дисплеїв з декількома вхідними потоками даних, більшими вимогами до об’єднання даних та розширеними можливостями генерації зображення. Також окреслено перспективи подальшого розвитку систем індикції з використання систем на кристалі, зокрема покращення їх характеристик, розширення функціональних можливостей, а також зменшення габаритів і енергоспоживання.

Список літератури

[1] E. Theunissen, J. Koeners, F. Roefs, R. M. Rademaker, R. Jinkins, and T. Etherington, “Guidance, Situation Awareness and Integrity Monitoring with an SVS+EVS,” Jun. 19, 2005. doi: 10.2514/6.2005-6441.

[2] L. J. Kramer et al., “Using vision system technologies to enable operational improvements for low visibility approach and landing operations,” Oct. 01, 2014. doi: 10.1109/dasc.2014.6979422.

[3] J. J. Arthur et al., “A review of head-worn display research at NASA Langley Research Center,” Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE, vol. 9470. SPIE, p. 94700, May 21, 2015. doi: 10.1117/12.2180436.
[4] P. Verma, V. Karar, V. Niranjan, and S. S. Saini, “Analysis of Displays Attributes for use in Avionics Head up Displays,” Jul. 18, 2015. doi: 10.5120/21680-4778.
[5] H.-W. Chen, J. Lee, B.-Y. Lin, S. Chen, and S. Wu, “Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives,” Light Science & Applications, vol. 7, no. 3. Springer Nature, p. 17168, Dec. 01, 2017. doi: 10.1038/lsa.2017.168.
[6] M. Firth, A. Norris, D. Segler, and J. Thompson, “DLP® Technology: Next generation augmented reality head-up display.” Sep. 2018.
[7] S. Martin and J. Watanabe, “DLP® Technology: Solar loading in augmented reality head-up display systems.” Jul. 2018.
[8] C. B. Watkins and R. Walter, “Transitioning from federated avionics architectures to Integrated Modular Avionics,” Oct. 01, 2007. doi: 10.1109/dasc.2007.4391842.
[9] T. Keller and P. Grunwald, “ARINC 818 adds capabilities for high-speed sensors and systems,” Jun. 26, 2014, SPIE. doi: 10.1117/12.2050972.
[10] P. Grunwald, “ARINC 818 specification revisions enable new avionics architectures,” Jun. 13, 2014, SPIE. doi: 10.1117/12.2050965.
[11] M. Billings, “CRT Replacement for the Next Generations Head-Up Display.” 2000.