

МЕТОДИ ІНТЕГРАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В КЛАСИЧНІ ПРОЦЕСИ СТВОРЕННЯ АНІМАЦІЙНОГО КОНТЕНТУ

Дейнеко Ж.В.

к.т.н., професор, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0003-0175-4181

Криворучко М.О.

аспірант, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки

Морозова Л.Ю.

старший викладач, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0001-5317-1813

***Анотація.** У дослідженні розглянуто трансформацію класичних процесів створення двовимірного анімаційного контенту під впливом сучасних технологій штучного інтелекту, визначено особливості інтеграції AI-інструментів у створення концепт-арту, візуальних концепцій, дизайну персонажів. У роботі здійснено порівняльний аналіз традиційних і AI-інтегрованих виробничих моделей, що дозволило виявити переваги штучного інтелекту – швидкість, масштабованість та оптимізацію рутинних процесів – і водночас окреслити його обмеження, зокрема недостатній художній контроль, стилістичну нестабільність і обмежену придатність до професійного виробництва. Доведено, що генеративний ШІ є найбільш ефективним як інструмент підтримки, прискорення та розширення творчого пошуку, а не як повна заміна класичних художніх методів. Особливу увагу приділено етичним, правовим та авторським аспектам використання ШІ, професійній трансформації ролі аніматора та розвитку гібридних виробничих моделей, у межах яких класичні принципи анімації поєднуються зі спеціалізованими AI-рішеннями.*

***Ключові слова:** генеративні моделі, системи штучного інтелекту, комп'ютерна анімація, анімаційний контент, концепт-арт, дизайн персонажів, пайплайн, візуальні концепції.*

Вступ

Сучасна анімаційна індустрія переживає етап глибокої технологічної трансформації, пов'язаної з активним розвитком систем штучного інтелекту (ШІ), машинного навчання та генеративних моделей. На зміну трудомісткій лінійній архітектурі створення анімації приходить інтелектуальна автоматизація. Якщо раніше кожен етап – від концепт-арту до рендерингу потребував значних ресурсів, то нині використання ШІ дозволяє радикально прискорити та підсилити ці процеси через інтеграцію інтелектуальних рішень [1]. Штучний інтелект інтегрований у традиційні анімаційні процеси, зробив можливим створювати високоякісні анімаційні розваги швидше та доступніше. ШІ революціонізує світ 2D-анімації за допомогою функції перетворення тексту на відео. Існує безліч

генераторів 2D-анімації, які дозволяють створювати чудові відеоролики. Крім того, ці інструменти автоматизують такі трудомісткі завдання, як синхронізація рухів губ для персонажів та створення фону. Таким чином вони дозволяють аніматорам зосередитися на творчості, а розширені функції, такі як ротоскопування (ротоскопія) [2], також використовують штучний інтелект для відстеження відеоматеріалів у реальному часі. Ці творці відео зі штучним інтелектом аналізують величезні обсяги даних для створення виразної анімації. Більше того, функція генерації сценаріїв із використанням штучного інтелекту також інтегрована в деякі інструменти для створення захоплюючих історій [3].

Особливого значення набуває інтеграція генеративного штучного інтелекту (Generative AI), включаючи дифузійні моделі, GAN-архітектури у класичні виробничі пайплайни. Такі інструменти, як Midjourney, Stable Diffusion, Runway, Adobe Firefly, EbSynth, Cascadeur [1, 3] та інші, вже сьогодні змінюють підходи до створення концепт-арту, дизайну персонажів, автоматизації створення проміжних кадрів (фазування), генерації рухових послідовностей, узгодження міміки з мовленням, нейронної візуалізації та локалізації контенту.

Водночас широке впровадження ШІ не означає повної заміни класичних методів анімації. Найбільш перспективним напрямом є саме гібридна інтеграція, за якої штучний інтелект виступає інструментом оптимізації, прискорення та розширення творчих можливостей фахівця, а не його повною заміною. Це особливо важливо в контексті збереження художньої цінності, авторського контролю та стилістичної цілісності продукту.

Мета та задачі дослідження

Метою цього дослідження є вивчення впливу, який штучний інтелект мав на традиційні методи анімації, та дослідження наслідків, які це може мати в майбутньому. Це дослідження надасть уявлення про те, як штучний інтелект революціонізує процес створення сучасних анімацій. Актуальність теми дослідження зумовлена безпрецедентною швидкістю цифрової трансформації медіаіндустрії, де анімаційний контент посідає ключове місце як у розважальному, так і в освітньому та науковому секторах.

Стрімкий розвиток генеративних моделей штучного інтелекту протягом 2023-2025 радикально змінив підходи до оптимізації найбільш трудомістких етапів створення контенту, дозволивши інтегрувати інтелектуальні алгоритми в процеси автоматичного фабування, пошарової сегментації персонажів та генерації складних рухових послідовностей. Сучасний етап розвитку галузі характеризується гострим протиріччям: з одного боку, зростають вимоги глядача до візуальної складності та гіперреалізму, а з іншого – класичні методи виробництва залишаються надмірно ресурсозатратними та тривалими. У цьому

контексті штучний інтелект виступає не лише як інструмент автоматизації, а як каталізатор нової виробничої парадигми [1-5].

Об'єктом дослідження є технологічний процес створення анімаційного контенту в умовах цифровізації. Предметом дослідження є методи та алгоритми інтеграції інтелектуальних систем у традиційні етапи анімаційного виробництва.

Метою монографії є наукове обґрунтування та розробка гібридної моделі анімаційного пайплайну, що поєднує авторську креативність із потужністю обчислювальних нейромережових структур. Попри стрімке зростання популярності AI-інструментів, існує низка суперечностей:

- недостатній рівень точного контролю над генеративними результатами;
- проблеми авторського права та використання навчальних датасетів;
- ризик стандартизації художніх стилів;
- складність інтеграції нових технологій у традиційні виробничі цикли.

У зв'язку з цим особливо актуальним є системне дослідження методів інтеграції ШІ саме в класичні процеси виробництва анімації з урахуванням технічних, художніх та етичних аспектів [4, 5]. У дослідженні систематизовано актуальні підходи до впровадження ШІ в анімаційну індустрію не як сукупності автономних засобів генерації, а як фундаментальної складової модернізованого технологічного циклу. Такий підхід дозволяє інтерпретувати ШІ як невід'ємний компонент інноваційної моделі гібридного креативного виробництва.

Основна частина

Основні напрями розвитку анімації

Традиційний процес створення анімаційного продукту, відомий у професійному середовищі як «пайплайн» (pipeline), є строго лінійною та багатоетапною структурою. Його генезис сягає фундаментальних праць піонерів анімації, зокрема Френка Томаса та Оллі Джонстона, які у своїй праці «The Illusion of Life: Disney Animation» сформулювали 12 принципів, що стали стандартом оживлення статичних образів [6]. Попри перехід від целулоїдної анімації до комп'ютерної (CGI), логіка виробничого циклу залишилася майже незмінною, поділяючись на три макроетапи: препродакшн, продакшн та пост-продакшн.

На етапі препродакшну формується концептуальний фундамент: розробка сценарію, розкадровка (storyboard) та створення візуального стилю (concept art). Ключовим обмеженням тут є висока залежність від ручної праці художників, де будь-яка концептуальна зміна на кінцевих стадіях потребує повного перемальовування значних масивів даних. Як зазначає Річард Вільямс у «The Animator's Survival Kit» [7], саме на цьому етапі закладається «таймінг» та «спейсинг», які вимагають від спеціаліста не лише художнього хисту, а й глибокого розуміння фізики руху [8].

Попри стрімкий розвиток цифрових технологій, класичні принципи 2D-анімації – покадровість, ключова анімація, композиція кадру, стилізація руху та поетапна організація виробництва – залишаються визначальними як у традиційних, так і в цифрових процесах. Саме тому дослідження еволюції класичних методів створення двовимірного анімаційного контенту є необхідним для розуміння способів інтеграції штучного інтелекту в сучасне виробництво.

Одним із найскладніших та найбільш трудомістких процесів є фазування (in-betweening) – створення проміжних кадрів для досягнення плавності руху. На прикладі маятника можна зрозуміти, що крайні – це місця зміни напрямку руху, тобто кінці дуги, де напрямок руху змінюється [7, 8]. Оскільки довжина осі маятника під час гойдання не змінюється, то середня позиція в русі утворює дугу, і це демонструє наскільки ця середня позиція між двома крайніми положеннями маятника важлива у русі. І саме цю позицію називають «прохідною позицією між двома крайніми» або позицією брейкдауну (рис. 1).

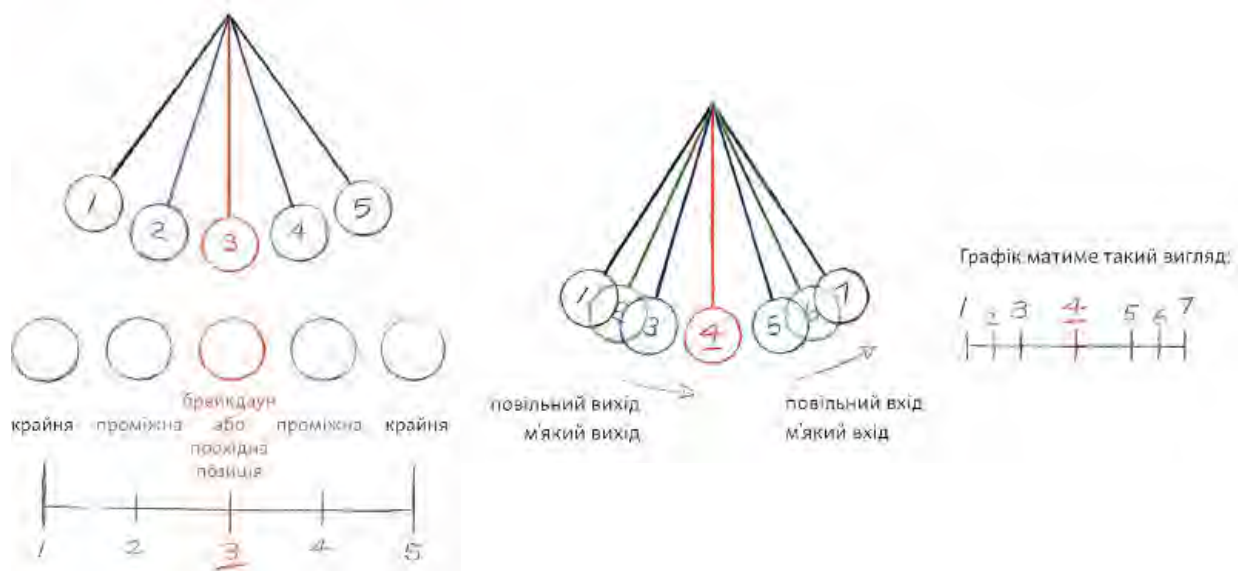


Рисунок 1 – Графік та основні позиції маятника при русі

І тому для прискорення або уповільнення, аніматори додають ще кілька проміжних кадрів на кінцях дуги, тим самим досягається плавність рухів, чого напевно, не створює жодна генеративна система штучного інтелекту. Геніальний аніматор Ерік Ларсон, наставник молодшого покоління аніматорів студії Диснея, казав, що анімація повинна бути зміною форми [8]. Сучасні аніматори створюють тільки ключові кадри, а проміжні домальовують комп'ютерні редактори (рис. 2).

У традиційних системах, навіть за умови використання комп'ютерної інтерполяції, аніматор змушений вручну коригувати «ключі», щоб уникнути механістичності руху. Додатковим технологічним бар'єром постає симуляція фізичних середовищ: волосся, тканин, рідин. Ці процеси потребують колосальних обчислювальних потужностей та багаторазових ітерацій для досягнення прийнятного результату.

Завершальний етап (постпродакшн) – фокусується на рендерингу, композитингу та корекції кольору. Рендеринг залишається «вузьким місцем» класичного виробництва. Попри розвиток апаратного забезпечення, прагнення до фотореалізму (обчислення трасування променів, глобального освітлення) змушує студії витрачати тижні на обробку фінальних кадрів.



Рисунок 2 – Плавність та реалістичність рухів

Таким чином, аналіз класичного анімаційного пайплайну виявляє низку критичних обмежень: висока собівартість, часова інертність та складність масштабування. Ці чинники створюють об'єктивну потребу у впровадженні інтелектуальних методів, здатних взяти на себе рутинні обчислювальні завдання, звільнивши простір для чистої візуальної творчості.

Трансформація традиційної рисованої анімації у цифрову форму не обмежилася простою заміною аналогових носіїв інформації, а призвела до повної деконструкції класичного виробничого циклу, відомого як «целулоїдна технологія» (cel-animation). У класичній парадигмі кожен кадр був результатом фізичного нашарування прозорих листів із графічними об'єктами, що потребувало складних процесів ручного контурування та заливки. Цифрова трансформація запропонувала перехід до віртуального багатошарового простору, де графічна сутність об'єкта визначається методами математичної дескрипції [].

Першим фундаментальним кроком у цій еволюції стала поява векторної графіки. Впровадження кривих Без'є як математичного базису для опису контурів персонажів дозволило подолати проблему роздільної здатності та забезпечило можливість неруйнівного редагування (non-destructive editing). Наукові розробки в галузі геометричного моделювання 2D-форм дали змогу аніматорам маніпулювати не окремими пікселями, а цілісними об'єктами, що мають власні атрибути (товщину лінії, градієнт, координати вузлів). Це стало фундаментом для автоматизації фазування. Алгоритм визначає траєкторію руху векторних вузлів між ключовими кадрами, що дозволяє системі самостійно вибудовувати візуальні перетворення малюнка. Другим етапом стало впровадження цифрового композитингу та віртуальних камер. Традиційне

використання багатоплощинних камер (multiplane cameras) для створення паралакс-ефекту було замінено програмними алгоритмами, що імітують тривимірний простір у межах двовимірної сцени. Це дозволило інтегрувати складні математичні моделі освітлення та затінення безпосередньо у 2D-макети.

Проте цифровізація 2D-анімації виявила специфічне технологічне протиріччя. З одного боку, інструменти скелетної деформації (2D rigging) дозволили значно прискорити анімацію шляхом прив'язки растрових або векторних елементів до ієрархічних «кісток». З іншого боку, така механізація часто призводить до втрати динамічної виразності, притаманної класичній школі.

Аналіз цього перехідного періоду свідчить, що цифрова трансформація забезпечила технічну базу для сучасної 2D-анімації, але водночас створила нові виклики, пов'язані з надмірною алгоритмічністю та втратою індивідуального художнього стилю. Це сформувало об'єктивний запит на інтелектуальні системи, які здатні не просто механічно деформувати об'єкт, а аналізувати його семантичну та художню структуру. Таким чином, цифрова еволюція 2D-анімації підготувала підґрунтя для переходу від «пасивного» цифрового інструменту до «активного» інтелектуального середовища, де ШІ виступає медіатором між математичним розрахунком та візуальною естетикою [11, 12].

Трансформація анімаційного виробництва з аналогової площини в цифрову парадигму не була лише зміною інструментарію, а призвела до фундаментальної зміни самого поняття «рухомого образу». На відміну від традиційної графіки, де кожен кадр є статичною фізичною одиницею, цифрова анімація базується на принципах математичного моделювання об'єктів у віртуальному тривимірному просторі. Цей перехід ознаменував початок епохи комп'ютерно-генерованих зображень (CGI), де візуалізація стала результатом обчислювальних процесів.

Першим етапом цифрової трансформації стала дискретизація зображення, що дозволило замінити традиційні графічні матеріали цифровим растром. Проте справжня революція відбулася з впровадженням методів геометричного моделювання. Наукові праці піонерів комп'ютерної графіки, таких як Айвен Сазерленд (Ivan Sutherland) та Едвін Кетмелл (Edwin Catmull), заклали основи алгоритмічного опису поверхонь [10-12].

Важливе місце в еволюції цифрового виробництва посідає впровадження методів фотометричного рендерингу. Поступовий перехід від спрощених моделей затінення (зокрема за алгоритмами Гуро чи Фонга) до вискоєфективних систем трасування променів (Ray Tracing) та глобального освітлення (Global Illumination) став амбітною спробою математично апроксимувати фізичну поведінку світла [10; 11]. Ці інновації дозволили анімації вийти за межі умовної візуалізації та наблизитися до фотореалістичного відтворення середовища.

Паралельно з розвитком візуалізації відбувалася еволюція методів керування рухом. Впровадження інверсної кінематики (IK) та процедурної

анімації дозволило частково автоматизувати розрахунок траєкторій кінцівок персонажів. Проте, попри високий рівень математизації, ці системи залишалися жорстко алгоритмізованими: вони могли розрахувати фізично коректне падіння об'єкта, але не могли імітувати складну біомеханіку живих істот без детального втручання аніматора. Це зумовило розвиток та широке впровадження технологій захоплення руху (Motion Capture), що фактично є методом оцифрування живої аналогової пластики для її подальшої аплікації на цифрову модель [13, 14]. Такий підхід став першим кроком до подолання «механістичності» руху, що згодом підготувало ґрунт для інтеграції інтелектуальних систем синтезу руху.

Дизайн персонажа – це не сама лише розробка зовнішнього вигляду персонажа, а й розгляд потенційних властивостей його тіла і здатності змінювати форму, зокрема визначення таких особливостей, як зріст, постава, жести, рухи й експресія. Одна з історично важливих технік, застосовуваних у анімації персонажів, – стиль «гумових шлангів», названий так тому, що в ньому рухам персонажів, зазвичай задля більшої ефектності, умисно надавали надмірної еластичності. Цей підхід було розроблено у Walt Disney Studios у 1930-х роках, коли індустрія анімації почала набирати обертів і нарощувати обсяги [4, 6-9].

Рішення Уолта Діснея залучати до анімації художників визначило її форму, і під їхнім впливом у масову практику індустрії впроваджувалися художні принципи анатомії та руху. Художники експериментували з анімаційними техніками, шукаючи нових способів утілити розмаїття і складність вираження людських форм. Такі підходи згодом привели до застосування в повнометражних фільмах так званої «повної анімації»: кожен кадр відмальовували від руки, прагнучи повного контролю над рухами персонажа, що забезпечувало плавність візуального сприйняття й давало більше простору для творчих рішень.

Науково-технологічні передумови впровадження інтелектуальних систем у 2D-анімацію

Еволюція двовимірної анімації в цифрові технології характеризується переходом від механічного копіювання аналогових методів до створення складних обчислювальних середовищ, що базуються на растровій та векторній графіці [5, 11]. Попри повну цифровізацію інструментарію, структура виробничого циклу в 2D-анімації залишається найбільш критичною до часових витрат через необхідність повної або часткової перемальовки кожного кадру. Ця технологічна інертність зумовила пошук інтелектуальних методів автоматизації, спрямованих на вирішення ключових проблем галузі.

Першою передумовою впровадження ІІІ стала проблема автоматизації фазування (in-betweening). У класичній 2D-анімації створення проміжних кадрів між «ключами» є найбільш трудомістким процесом, що потребує значних людських ресурсів для збереження пластичності та об'єму персонажа. Традиційні алгоритми лінійної та векторної інтерполяції, впроваджені в таких

програмних комплексах, як Adobe Animate або Adobe After Effects, часто виявляються неспроможними коректно обробляти складні ракурси та перекриття. Наукові дослідження в галузі комп'ютерного зору вказують на те, що лише нейромережеві структури, здатні до семантичного аналізу форми, можуть забезпечити немеханістичне «добудовування» відсутніх фаз руху, зберігаючи авторську стилістику лінії.

Другим чинником є сегментація та автоматичне розфарбовування (Auto-Colorization). Процес «заливки» замкнених контурів у 2D-анімації вимагає значної уваги до деталей, особливо при роботі з динамічними тінями та градієнтами. Традиційні методи обмежені неможливістю розпізнавання об'єктів як цілісних сутностей. Впровадження інтелектуальних агентів, що базуються на нейронних мережах, дозволяє ідентифікувати частини тіла персонажа або елементи фону незалежно від ступеня їх деформації, що радикально скорочує час на фінальну обробку кадру.

Економічний аспект також відіграє вирішальну роль. Висока собівартість ручної 2D-анімації призвела до домінування так званої скелетної анімації, де персонаж розбивається на окремі сегменти. Хоча це спрощує виробництво, воно суттєво обмежує художню виразність, роблячи рух «маріонетковим». Інтелектуальні технології обіцяють подолати цей розрив, дозволяючи поєднувати швидкість маніпуляції маріонеткою з естетикою класичного малюнка через алгоритми нейронного переносу стилю та автоматичну деформацію растра на основі глибокого навчання.

Аналіз актуальних публікацій свідчить про те, що інтеграція штучного інтелекту (ШІ) в анімацію відбувається за трьома основними векторами: автоматизація рутинних процесів (in-betweening, розфарбовування), генерація контенту на основі текстових описів та підвищення контрольованості дифузійних моделей [1, 3]. Еволюція двовимірної анімації демонструє, що її розвиток відбувався не через заперечення попередніх методів, а через їх адаптацію до нових технологічних умов: від ручної покадрової праці до створення контрольованого, виразного та художньо цілісного руху.

Саме тому інтеграція штучного інтелекту в 2D-анімацію повинна розглядатися як продовження цієї еволюції: не як заміна художника, а як розширення інструментарію в межах уже сформованих класичних процесів. Найбільш перспективним є hybrid pipeline, де AI автоматизує технічні етапи, залишаючи стратегічний, художній і стилістичний контроль за автором.

Результати дослідження

Машинне навчання як інструмент трансформації класичного анімаційного pipeline

Впровадження методів машинного навчання (Machine Learning) у двовимірну анімацію виступає фундаментальним чинником реконфігурації сучасних технологій. На відміну від ранніх форм цифрової автоматизації, що

базувалися на жорсткій шаблонізації або процедурних алгоритмах, системи машинного навчання оперують аналізом великих масивів візуальних даних. Це дає змогу виявляти приховані закономірності та відтворювати складні патерни динаміки, стилістики й композиції, делегуючи інтелектуальним системам не лише рутинні операції, а й частину творчих завдань. У структурі 2D-анімації машинне навчання постає не як альтернатива класичному пайплайну, а як інтелектуальна надбудова, що інтегрується в окремі виробничі ланки задля їхньої стандартизації та системного масштабування.

Основні напрями застосування машинного навчання у 2D-анімації.

1. Автоматизація in-betweening (створення проміжних кадрів).

Одним із найбільш трудомістких класичних етапів є створення проміжних фаз руху між ключовими позами (Pose to Pose). Традиційно цей процес виконувався вручну або частково автоматизовано через інструменти інтерполяції. ML-моделі дозволяють:

- аналізувати ключові кадри;
- прогнозувати траєкторії руху;
- генерувати проміжні пози;
- адаптувати деформацію форми.

Це особливо ефективно для серійного виробництва, де необхідно підтримувати стабільність стилю за високих обсягів контенту. Но існує основне обмеження – ML-системи можуть помилятися у складних експресивних рухах, де художня стилізація переважає фізичну логіку.

2. Cleanup automation.

Cleanup automation – це процес фінального уточнення ліній, контурів об'єктів анімації, це один із найбільш трудомістких і водночас критично важливих етапів класичної анімації, процес фінального очищення, уточнення та стандартизації анімаційного рисунка. Сучасні ML-підходи використовують для:

- очищення ліній;
- стабілізації товщини контуру;
- усунення артефактів;
- підтримки послідовності між кадрами.

На стадії чорнової анімації художник зосереджується на пластиці руху, таймінгу, емоційній виразності та ключових фазах, тому первинні кадри часто містять допоміжні лінії, конструктивні побудови, нестабільну товщину контуру, неточності пропорцій або випадкові графічні артефакти. Cleanup передбачає переведення цього «живого», але технічно сирого матеріалу у фінальний виробничий формат, придатний для подальшого фарбування, композитингу та серійного використання. У класичній анімації cleanup виконувався фахівцями, які вручну перемальовували кожен кадр, зберігаючи стиль персонажа, стабільність лінії, пропорції та модельну цілісність.

Сучасні системи машинного навчання використовують методи перетворення зображення в зображення, моделі уточнення контурів та алгоритми стабілізації лінії для автоматизованого аналізу чорнових кадрів і перетворення їх

у технічно підготовлений до виробництва результат. Система здатна визначати основні контури персонажа, відокремлювати допоміжні конструктивні штрихи від фінального рисунка, стабілізувати товщину лінії, усувати небажане тремтіння між кадрами та підтримувати цілісність візуального дизайну персонажа впродовж усієї сцени (рис. 3).



Рисунок 3 – Створена III сцена рухів персонажу

Особливо важливим аспектом є часова узгодженість – здатність алгоритму не лише якісно очищувати окремий кадр, але й забезпечувати стабільність лінії у послідовності руху. За відсутності такого підходу автоматизований cleanup може створювати ефект «плаваючого» або нестабільного контуру, що негативно впливає на професійне сприйняття анімації та руйнує враження цілісності руху. Саме тому сучасні технології дедалі частіше поєднують комп'ютерний зір із нейронними архітектурами, орієнтованими на аналіз послідовностей, які враховують не окреме зображення, а серію взаємопов'язаних кадрів. Водночас повна автоматизація має низку суттєвих обмежень. У стилізованій анімації, де навмисна нерівність контуру, експресивна деформація форми або графічна нестандартність є свідомою частиною художньої мови, машинне навчання може надмірно стандартизувати або «нормалізувати» зображення, позбавляючи його авторської індивідуальності. У таких випадках система може технічно покращувати рисунок, але водночас знижувати його художню виразність. Саме тому ефективною вважається модель частково автоматизованою, за якої система

виконує первинне технічне очищення, тоді як художник зберігає фінальний контроль над стилем, характером лінії та естетичною цілісністю анімації.

3. Фарбування та колоризація (Colorization і style consistency).

Фарбування є не лише технічним, а й художньо стратегічним етапом 2D-анімації, оскільки колір визначає не тільки впізнаваність персонажа, але й емоційну атмосферу сцени, композиційний баланс, візуальну драматургію та брендову цілісність продукту. У традиційній анімації колоризація передбачає ручне заповнення кольором визначених зон. І навіть незначні колірні відхилення можуть призводити до втрати стилістичної єдності. Алгоритм аналізує структуру персонажа, розпізнає окремі зони (волосся, шкіра, одяг, аксесуари), співвідносить їх із заданою палітрою та автоматично застосовує кольорову модель до нових кадрів (рис. 4).



Рисунок 4 – Фарбування та колоризація в 2D-анімації

Особливого значення набуває збереження кольорової та стилістичної цілісності (style consistency) між різними сценами, епізодами або навіть сезонами. Наприклад, зміна освітлення, композиції або тону фону не повинна порушувати впізнаваність персонажа. ML-моделі можуть навчатися на style guides конкретного проєкту, підтримуючи:

- сталість кольорової температури;
- consistency shading;
- контроль локальних кольорів;
- адаптивне освітлення без втрати модельної точності.

У більш складних виробничих сценаріях ШІ може функціонувати не лише як інструмент автоматичного заповнення кольором, а як система стилістичної адаптації, здатна враховувати художні принципи, кольорові моделі та візуальні правила конкретного анімаційного проєкту. Це означає, що алгоритм може аналізувати не лише окремі кольорові зразки, але й загальну стилістику – характер освітлення, тональність сцени, колористичну драматургію та особливості художнього рішення. Завдяки цьому система здатна підтримувати не просто технічне фарбування, а цілісність стилю в межах усього виробництва.

Однак навіть за такого рівня розвитку існує ризик упередженості навчального набору даних, коли модель, спираючись на шаблонні

закономірності, переносить типові або статистично домінантні кольорові рішення на сцени, де насправді необхідне нестандартне режисерське чи художнє рішення. Наприклад, система може автоматично прагнути до «правильного» освітлення або типового колористичного балансу там, де автор свідомо використовує незвичні кольорові контрасти, драматичну стилізацію чи символічну палітру [14]. У такому випадку автоматизація може обмежувати художню свободу, підмінюючи творчий задум алгоритмічною стандартизацією.

Сучасні моделі автоматизованого фарбування дозволяють оптимізувати процес роботи з персонажами та сценами завдяки використанню таких технологічних підходів, як:

- опорні кадри (reference frames), що задають зразки кольорового рішення для наступних сцен;
- навчання палітри (palette learning), за якого система засвоює характерну кольорову модель конкретного персонажа або середовища;
- визначення окремих зон зображення (region detection), яке дозволяє алгоритму розпізнавати межі між елементами сцени;
- семантична сегментація (semantic segmentation), що забезпечує розподіл зображення за змістовими категоріями, наприклад волосся, шкіра, одяг, фон або об'єкти середовища.

Поєднання цих підходів дає змогу значно скоротити час на рутинне фарбування, особливо у серійному виробництві, де необхідно підтримувати високу швидкість роботи без втрати стилістичної цілісності. Проте ключовою умовою ефективності залишається збереження людського контролю над художнім результатом.

4. Lip-sync automation.

Одним із найбільш практично цінних напрямів є автоматизація синхронізації артикуляції з аудіо. ML systems аналізують:

- фонему;
- темп мовлення;
- емоційні характеристики голосу.

Автоматизація синхронізації мовлення з артикуляцією належить до найбільш практично значущих і комерційно затребуваних напрямів застосування машинного навчання у сфері двовимірної анімації. Особливо важливу роль вона відіграє у виробництві серіального контенту, дубляжі, локалізації та створенні багатомовних анімаційних проєктів, де великі обсяги діалогів потребують швидкої, точної та масштабованої обробки. У традиційному виробничому процесі синхронізація артикуляції здійснювалася вручну: аніматори співвідносили послідовність фонем із відповідними формами рота персонажа, покадрово підлаштовуючи артикуляційні переходи до звукового ряду. Такий підхід забезпечував високий рівень контролю, однак вимагав значних часових витрат, особливо у сценах із великою кількістю персонажів або складною мовленнєвою динамікою.

Сучасні системи lip-sync значно оптимізують цей процес завдяки автоматизованому аналізу аудіоматеріалу. Такі алгоритми здатні розпізнавати

фонетичну структуру мовлення, темп, інтонаційні особливості, тривалість пауз, ритмічний малюнок фрази та навіть окремі емоційні характеристики голосу. На основі цих даних система формує часову модель артикуляційних переходів, що дозволяє автоматично генерувати базову структуру рухів рота персонажа відповідно до мовлення. У межах сучасного виробництва це дає змогу автоматизувати кілька важливих компонентів:

- створення базової артикуляції персонажа;
- побудову часових переходів між артикуляційними фазами;
- генерацію вторинної міміки обличчя;
- адаптацію артикуляції до різних мовних версій.

Водночас надмірна автоматизація цього процесу має свої обмеження. Попри технічну точність, алгоритми часто не здатні повною мірою відтворити акторську переконливість, оскільки людське мовлення містить складні емоційні нюанси, асиметричні рухи, індивідуальні особливості дикції та ритмічні варіації, які важко повністю формалізувати. У результаті автоматично згенерована артикуляція може виглядати правильною з технічного погляду, але недостатньо живою або драматично виразною. Саме тому найбільш ефективним підходом вважається модель, за якої ШІ використовується як інструмент прискорення етапу синхронізації, тоді як фінальна художня корекція залишається за аніматором. Такий підхід дозволяє поєднати швидкість автоматизації з творчим контролем, забезпечуючи баланс між виробничою ефективністю та художньою якістю.

5. Rotoscoping та motion transfer.

Rotoscoping історично використовувався як техніка покадрового обведення відеоматеріалу для досягнення реалістичної пластики руху. У сучасній 2D-анімації ця практика трансформувалася завдяки машинному навчанню. Computer vision systems можуть автоматично визначати контури, сегментувати персонажа, відстежувати суглобові точки та реконструювати рухову структуру. Це значно скорочує час створення складних динамічних сцен і відкриває можливість перенесення рухових характеристик із одного джерела на інший персонаж. Наприклад, реальний танцювальний або бойовий рух може бути адаптований до двовимірного стилізованого героя зі збереженням таймінгу та основної кінематики. Також motion transfer дозволяє переносити характеристики руху з відеореференсу на 2D-персонажа, що відкриває нові можливості hybrid production.

6. Генеративні моделі у препродакшені.

На етапі препродакшену генеративні моделі демонструють найбільшу ефективність, оскільки саме тут пріоритетом є швидкість і варіативність, а не абсолютна технічна точність. У концептуальному виробництві важливо швидко тестувати художні напрями, стилі, середовища та персонажні рішення.

Генеративний ШІ може використовуватися для:

- створення візуальних концепцій (moodboards);
- пошуку та розробки первинних ідей дизайну персонажів;
- формування концепцій середовища та просторового оточення;

- розробки кольорових сценаріїв;
- стилістичне експериментування та пошуку художніх рішень.

Це дозволяє значно прискорити ранню фазу візуального пошуку та розширити спектр варіантів. Наприклад, художник може за короткий час отримати десятки композиційних чи стилістичних напрямів, які вручну потребували б значно більших ресурсів.

Висновки

У результаті дослідження методів інтеграції ШІ в класичні процеси створення анімаційного контенту було встановлено, що сучасний етап розвитку анімаційної індустрії характеризується переходом від ізольованого використання цифрових технологій до системної трансформації виробничих моделей на основі нових підходів, підсилених ШІ. Дослідження показало, що найбільш ефективна інтеграція ШІ реалізується на тих етапах, де виробничий процес містить значну частку повторюваних, технічно стандартизованих або часовитратних завдань. Водночас виявлено, що ефективність подібної автоматизації прямо залежить від рівня стилістичної стандартизації проєкту: чим вищий рівень художньої унікальності або експресивної деформації, тим нижчою є автономна продуктивність AI-систем без людського коригування.

На рівні препродакшену встановлено, що генеративні інструменти демонструють найбільшу результативність у сфері концептуального пошуку, візуальної концепції (moodboarding), варіативного тестування художніх напрямів та сценарно-візуальної розробки. Головна перевага полягає у прискоренні переходу від ідеї до первинної візуалізації. Проте результати дослідження підтверджують, що сучасні генеративні моделі мають фундаментальні обмеження щодо контрольованості, повторюваності, точного редагування та готовності до професійного виробничого використання. Це дозволяє зробити висновок, що на поточному етапі розвитку генеративний ШІ є найбільш доцільним як інструмент розширення творчого пошуку, але не як універсальна заміна класичних професійних методів.

Порівняльний аналіз традиційного та AI-інтегрованого pipeline дозволив сформулювати принципове положення: найбільш перспективною моделлю розвитку сучасної анімації є гібридна система, у якій класичні художні принципи, режисерський контроль і професійна експертиза поєднуються з автоматизаційним потенціалом ШІ. Повна автоматизація на сучасному етапі не здатна забезпечити необхідний рівень творчої глибини, стилістичної стабільності та авторської відповідальності. Інтеграція ШІ спричиняє не лише технологічну, але й професійну трансформацію ролі аніматора. Відбувається поступовий перехід від моделі художника-виконавця до моделі художника-куратора, де ключовими компетенціями стають стратегічне мислення, здатність до критичного аналізу AI-результатів, управління генеративними процесами та міждисциплінарна цифрова грамотність.

Таким чином, розвиток технологій повинен супроводжуватися не лише технічною модернізацією, але й правовою та культурною адаптацією індустрії.

Штучний інтелект у анімаційному виробництві слід розглядати не як альтернативу класичній анімаційній школі, а як інструмент еволюційного розширення її виробничих, концептуальних та технологічних можливостей. Його найбільша ефективність проявляється в умовах інтегрованої моделі, де автоматизація підтримує технічні аспекти виробництва, а людина зберігає визначальну роль у художній інтенції, драматургії, етиці та творчому контролі. Новизна дослідження полягає в обґрунтуванні концепції гібридної інтеграції ШІ як найбільш продуктивної моделі розвитку сучасного анімаційного контенту, де технологія не витісняє мистецтво, а трансформує інструментальну природу його створення.

Список літератури.

1. Abootorabi, M.M., Ghahroodi, O., Zahraei, P. S., et al. (2025). Generative AI for Character Animation: A Comprehensive Survey of Techniques, Applications, and Future Directions. Computer Engineering Department, Sharif University of Technology. arXiv preprint arXiv:2504.19056v1. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.19056>.
2. VIDIO. (2025). Що таке ротоскопінг? Визначення, історія та сучасні інструменти пояснені. <https://www.vidio.ai/uk-UA/blog/article/what-is-rotoscoping-explained>.
3. Sun, Q., Ni, Y., Yuan, T., Zhang, J., Yang, F., Yao, Z., & Mi, H. (2025). SPIRITUS: An AI-Assisted Tool for Creating 2D Characters and Animations. Tsinghua University & Nanyang Technological University. arXiv preprint arXiv:2503.09127v1.
4. Гвінн, К., & Генні, І.Ф. (2012). Основи анімації: Вступ до цифрового мультимедіа. Київ: Видавець.
5. Кульчицький, О. (2005). Теорія і практика анімації. Київ: Ніка-Центр.
6. Thomas, F., & Johnston, O. (1981) Illusion Of Life, The: Disney Animation. Disney Editions Deluxe.
7. Williams, R. (2009) The Animator's Survival Kit: a Manual of Methods, Principles and Formulas for Classical, Computer, Games, Stop Motion and Internet Animators. Richard Williams. Faber & Faber.
8. Вільямс, Р. (2019). Анімація: посібник по виживанню. Київ: ArtHuss.
9. Селбі, Е. (2019). Анімація. Київ: ArtHuss.
10. Sutherland, I.E. (2003). Sketchpad: A man-machine graphical communication system. University of Cambridge. Computer Laboratory. <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-574.pdf>.
11. Foley, J.D., Van Dam, A., Feiner, S.K., & Hughes, J.F. (2013). Computer Graphics: Principles and Practice. Addison-Wesley.
12. Catmull, E.A (1974). Subdivision Algorithm for Computer Display of Curved Surfaces: PhD thesis. University of Utah. <https://content.lib.utah.edu/digital/collection/uumain/id/52670>.
13. Дейнеко, Ж.В., Криворучко, М.О. (2022) Моушен-дизайн як анімаційне мистецтво. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Т. 1. (с. 103-104).
14. Дейнеко, Ж.В., Зелений, О.П., & Криворучко, М.О. (2025). Технічні та творчі аспекти комп'ютерної анімації. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Сучасні тренди: колективна монографія. Т. 2. (с. 71-94). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид». <https://doi.org/10.30837/PMW.2025.T2.071>.