



УДК 004.925

# АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ СИМУЛЯЦІЇ ТКАНИН

## ANALYSIS OF CLOTH SIMULATION METHODS AND ALGORITHMS

Чехместрук Р. Ю.<sup>1</sup>, Романюк О. Н.<sup>2</sup>, Котлик С. В.<sup>3</sup>  
Chekhmestruk R. Y.<sup>1</sup>, Romanyuk O. N.<sup>2</sup>, Kotlyk S. V.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,

<sup>3</sup>Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

<sup>1,2</sup>Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine,

<sup>3</sup>Odesa National Technological of University, Odesa, Ukraine

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-5362-8796>, <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-2245-3364>

E-mail: chekhroma@gmail.com, rom8591@gmail.com, sergknet@gmail.com<sup>3</sup>

Copyright © 2025 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: [10.15673/atbp.v%vi%i.3089](https://doi.org/10.15673/atbp.v%vi%i.3089)

**Анотація.** Симуляція тканин є важливим аспектом у сферах комп'ютерної графіки, медичних візуалізацій та інженерії матеріалів. Розробка ефективних і реалістичних методів моделювання тканини вимагає міждисциплінарного підходу, що охоплює механіку суцільних середовищ, обчислювальну геометрію та методи чисельного інтегрування [1], [2]. Особливе значення це набуває у зв'язку зі швидким розвитком електронної комерції та стрімким зростанням кількості онлайн-магазинів, де все більш актуальними стають так звані “віртуальні примірочки”. У таких системах ключовим завданням є реалістичне відображення поведінки тканини під час її “одягання” на тривимірні моделі людей. Саме коректна симуляція складок, розтягнень і взаємодій тканини з тілом користувача визначає рівень довіри до віртуальних примірочних та безпосередньо впливає на прийняття рішень споживачами у процесі вибору одягу онлайн. Таким чином, дослідження різних методів симуляції тканин, а також їх можливих комбінацій, є важливим завданням для досягнення високої реалістичності та фізичної коректності віртуальних примірочних.

У статті проаналізовано чотири базові методи симуляції тканин: масово-пружинну модель (Mass-Spring), позиційну динаміку (Position-Based Dynamics, PBD), метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM) та гібридний метод (Hybrid). Наведено математичні постановки, розглянуто чисельні методи інтеграції та особливості обробки колізій. Представлено методологію експерименту, в якому для кожного методу вимірювалися FPS, час виконання, використання пам'яті, стабільність, максимальна деформація, енергія системи та точність обробки колізій. Масштабованість досліджено за рахунок збільшення кількості вершин із 100 до 1600. Результати показують, що Mass-Spring моделі дають найвищу швидкість, однак поступаються FEM у точності складних деформацій. PBD і Hybrid можуть слугувати компромісом між швидкістю та якістю, причому Hybrid підвищує точність локальних ділянок за рахунок поєднання з FEM. Зроблено висновок про залежність вибору конкретної моделі від пріоритетних вимог до швидкості, масштабованості та фізичної точності симуляції тканин, що є особливо важливим у віртуальних примірочних системах.

**Annotation.** Cloth simulation is critically important in computer graphics, medical visualization, and materials engineering. Developing efficient and realistic cloth modeling methods requires a multidisciplinary approach covering continuum mechanics, computational geometry, and numerical integration methods. This need is especially pressing due to the rapid growth of e-commerce and the increasing number of online stores, where “virtual fitting rooms” have become highly relevant. In such systems, realistic cloth behavior is crucial for accurately depicting garment draping on three-dimensional human models. Correct simulation of folds, stretching, and cloth-body interactions establishes user trust in virtual fitting solutions and directly influences consumer decisions in online clothing selection. Therefore, investigating various cloth simulation methods and their possible combinations is a significant step toward achieving high realism and physical accuracy in virtual fitting rooms.

This paper analyzes four fundamental cloth simulation methods: Mass-Spring, Position-Based Dynamics (PBD), Finite Element Method (FEM), and a Hybrid approach. The mathematical formulations, numerical integration schemes,



and collision handling features are reviewed. The experimental methodology includes measurements of FPS, execution time, memory usage, stability, maximum deformation, system energy, and collision handling accuracy for each method. Scalability is examined by increasing the number of vertices from 100 to 1600. The results show that Mass-Spring models achieve the highest performance, though they are less precise than FEM for complex deformations. Both PBD and Hybrid serve as compromises between speed and quality, with Hybrid leveraging local FEM calculations for improved accuracy. The study concludes that the choice of simulation model depends on priority requirements for speed, scalability, and physical precision, factors that are especially critical in virtual fitting systems.

**Ключові слова:** симуляція тканини, масово-пружинна модель, позиційна динаміка, метод скінченних елементів, гібридна модель, віртуальні примірочні, обчислювальна геометрія, масштабованість, деформація, колізії.

**Keywords:** cloth simulation, mass-spring model, position-based dynamics, finite element method, hybrid model, virtual fitting, computational geometry, scalability, deformation, collisions.

## Вступ

Симуляція тканин є важливим аспектом у сферах комп'ютерної графіки, медичних візуалізацій та інженерії матеріалів. Розробка ефективних і реалістичних методів моделювання тканини вимагає міждисциплінарного підходу, що охоплює механіку суцільних середовищ, обчислювальну геометрію та методи чисельного інтегрування [1], [5]. Особливе значення це набуває у зв'язку зі швидким розвитком електронної комерції та стрімким зростанням кількості онлайн-магазинів, де все більш актуальними стають так звані “віртуальні примірочні”. У таких системах ключовим завданням є реалістичне відображення поведінки тканини під час її “одягання” на тривимірні моделі людей. Саме коректна симуляція складок, розтягнень і взаємодій тканини з тілом користувача визначає рівень довіри до віртуальних примірочних та безпосередньо впливає на прийняття рішень споживачами у процесі вибору одягу онлайн. Таким чином, дослідження різних методів симуляції тканин, а також їх можливих комбінацій, є важливим завданням для досягнення високої реалістичності та фізичної коректності віртуальних примірочних.

## Аналіз літературних даних і постановка задачі

У межах аналізу літературних даних доцільно зосередити увагу на головних підходах до симуляції та моделювання тканини, які традиційно розподіляють на геометричні, фізичні та гібридні методи. Такий поділ дає змогу системно охопити широкий спектр наявних рішень, виявити їхні ключові переваги й обмеження та визначити оптимальні напрями для подальших досліджень і застосувань.

Серед геометричних підходів доцільно виокремити два поширені методи: масово-пружинну модель (Mass-Spring) та позиційну динаміку (Position-Based Dynamics, PBD) [2], [3].

Масово-пружинна модель. Тканина моделюється як система точкових мас  $m_i$ , з'єднаних між собою пружинами жорсткості  $k_{ij}$ . Рівняння руху для  $i$ -ї точки має вигляд:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} [-k_{ij} (\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - L_{ij}) \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|}] + \gamma \frac{d\mathbf{x}_i}{dt} + \mathbf{f}_i,$$

де  $\mathbf{x}_i$  – вектор просторової позиції  $i$ -ї маси,  $\mathcal{N}(i)$  – множина сусідніх вузлів,  $L_{ij}$  – довжина спокою пружини,  $\gamma$  – коефіцієнт демпфування,  $\mathbf{f}_i$  – зовнішні сили. Основу динаміки становлять пружні сили (закон Гука):

$$\mathbf{F}_{ij} = -k_{ij} \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - L_{ij}}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|},$$

та демпфування:

$$\mathbf{F}_{damp} = -\gamma \dot{\mathbf{x}}_i.$$

Обробка колізій може виконуватися через додаткові штрафні сили або корекцію позицій. Чисельна інтеграція часто базується на явних методах (Explicit Euler, Verlet), що забезпечує високу швидкодію при моделюванні в реальному часі. Для більш точного відтворення властивостей реальних матеріалів можуть додатково вводитися сили згину, анізотропія (коли властивості тканини залежать від напрямку ниток) чи шаруватість матеріалу [4]. Такі модифікації масово-пружинної моделі підвищують складність обчислень, проте дають змогу точніше контролювати деформації.

Позиційна динаміка (PBD). PBD застосовує геометричні обмеження, наприклад:

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| - L_{ij} = 0,$$

а положення вузлів коригуються ітеративно. Завдяки “прогнозуванню” нових позицій і послідовній корекції за обмеженнями досягається висока стійкість симуляції навіть за відносно великих кроків часу [5], [6]. Хоча явного підрахунку сил немає, корекція відстаней між вузлами еквівалентна пружним відновлювальним впливам. Демпфування реалізується через зменшення швидкостей вузлів або спеціальні обмеження на швидкості. Колізії формуються як геометричні обмеження непроникності, а чисельна інтеграція зазвичай включає прості схеми (явний метод Ейлера (Forward Euler) чи напівявний метод Ейлера (Semi-Implicit Euler)) та ітеративну корекцію (метод Гаусса–Зейделя (Gauss–Seidel)). Щоб наблизити поведінку тканини до справжніх матеріалів, можуть бути додані додаткові геометричні обмеження, зокрема кутові або об'ємні (для 3D-тканин чи багатошарових



систем)[7]. Крім того, реалізація анізотропії на рівні позиційних обмежень підвищує точність відтворення властивостей текстилю.

Серед фізичних підходів найбільш вагомим вважається метод скінченних елементів (Finite Element Method, FEM), що дає змогу розглядати тканину як суцільне середовище з урахуванням складних механічних взаємодій. Метод скінченних елементів (FEM) розглядає тканину як суцільне середовище, що задовольняє:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) + \mathbf{f},$$

де  $\mathbf{u}$  – вектор переміщень,  $\rho$  – густина,  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напружень,  $\mathbf{f}$  – зовнішні сили [3]. Для лінійного випадку  $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}$ , а при дискретизації у просторі отримують систему[8]:

$$\mathbf{M}\mathbf{u} + \mathbf{C}_d\mathbf{u} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f},$$

де  $\mathbf{M}$  – масова матриця,  $\mathbf{C}_d$  – демпфувальна,  $\mathbf{K}$  – жорсткісна матриця. Колізії реалізуються через контактні умови або спеціальні контактні елементи[14]. FEM дає змогу точно відтворювати складні деформації, але є обчислювально більш витратним порівняно з масово-пружинними та позиційними методами. У контексті FEM обробка зіткнень з твердими об'єктами чи самоперетин тканини може бути складнішою, ніж у масово-пружинних методах, через необхідність відстежувати контакт по всій площі елементів. Зазвичай це робиться через контактні умови (contact constraints) або додаткові контактні елементи, що вводяться у модель для опису взаємодії поверхні тканини з перешкодами. Такий підхід ускладнює реалізацію, проте забезпечує високу точність відтворення контактних явищ. Для інтеграції в часі часто застосовують неявні схеми (наприклад, метод Newmark або Hilber–Hughes–Taylor)[2] через їх крашу стійкість. Водночас у задачах реального часу іноді використовуються явні методи (як-от Central Difference), оскільки вони простіші у реалізації та можуть бути ефективнішими для розріджених матриць. Вибір інтегратора зазвичай залежить від вимог до стабільності, точності та швидкості обчислень. Додаткові можливості FEM охоплюють урахування нелінійної поведінки матеріалу, наприклад, гіперпружності[9], пластичності чи розривів у структурі. Такі розширення ускладнюють формулювання й обчислення, зате дозволяють більш адекватно відтворювати складні механічні ефекти, властиві реальним тканинам, зокрема неабіаку пружність чи історію навантажень.

Водночас гібридні методи поєднують елементи частинкових і суцільних моделей, завдяки чому забезпечують збалансований компроміс між швидкістю та точністю симуляції. Для поєднання швидкої частинкових моделей (Mass-Spring, PBD) із високою точністю FEM пропонуються гібридні підходи. Загальний рух обчислюється простим методом (наприклад, Mass-Spring), а FEM локально застосовується у зонах із критичними деформаціями чи колізіями[10]. Цей компроміс дозволяє зберегти переваги простих у реалізації частинкових методів та водночас скористатися високою точністю FEM для невеликої частини всієї сітки, що суттєво полегшує обчислення й забезпечує реалістичнішу поведінку у складних зонах. Гібридний підхід балансує між точністю та швидкістю, дозволяючи більш реалістично відтворювати складну поведінку тканини без надмірної обчислювальної вартості. Цей метод активно розвивається й застосовується у випадках, коли частинкові моделі вже не дають бажаної деталізації локальних явищ, а традиційний FEM виявляється надто дорогим для всього об'єму симуляції.

Сучасні дослідження також демонструють зростаючий інтерес до методів моделювання тканин на основі штучного інтелекту (ШІ), які здебільшого передбачають використання машинного навчання та глибинних нейронних мереж. У таких підходах симуляція тканини може бути трактована як задача апроксимації складної нестационарної динамічної системи[11]. Навчання проводять на великому наборі згенерованих чи емпірично зібраних даних, що охоплюють різноманітні конфігурації тканин, вплив гравітації, умови контакту та інші зовнішні фактори. При цьому мережа здатна вивчати відображення “вхідні параметри – вихідні деформації” і прогнозувати поведінку тканини в режимі реального часу з меншими обчислювальними витратами порівняно з традиційними фізичними чи геометричними методами[12]. Окрім того, використання методів навчання з підкріпленням (reinforcement learning) відкриває можливість адаптивного налаштування керування динамікою тканини залежно від конкретних умов середовища чи від цільових критеріїв симуляції. Подібні підходи, хоч і перебувають переважно на стадії активних досліджень, уже демонструють потенціал для значного скорочення обчислювальної складності та підвищення реалістичності відтворення складних поведінкових сценаріїв тканини.

Аналіз літературних джерел свідчить про наявність різних методів моделювання тканини з різними сильними та слабкими сторонами. Натомість проблемним питанням залишається вибір методу з огляду на реалістичність, швидкість та стійкість при великій кількості вузлів або за наявності складних колізій. Це підкреслює актуальність детального порівняння згаданих підходів для віртуальних примірочних систем і визначає постановку завдання даного дослідження.

#### Мета і завдання дослідження

Метою цієї роботи є порівняння чотирьох базових методів симуляції тканин: масово-пружинної моделі (Mass-Spring), позиційної динаміки (Position-Based Dynamics, PBD), методу скінченних елементів (FEM) і гібридного методу (Hybrid). Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- Розробити програмні реалізації зазначених методів із уніфікованими початковими налаштуваннями.
- Дослідити продуктивність (FPS, час виконання), використання пам'яті, ступінь стабільності, максимальну деформацію, енергію системи та точність обробки колізій у кожному методі.



- Оцінити масштабованість методів за зміни розміру сітки (з 100 до 1600 вузлів).
- Провести порівняння отриманих результатів і визначити найперспективніші підходи для застосувань у віртуальних примірочних системах.

#### Методи і матеріали досліджень

Для порівняльного аналізу було реалізовано чотири методи симуляції тканини (Mass-Spring, PBD, FEM, Hybrid) з використанням мови програмування Python, дотримуючись уніфікованих початкових умов:

1. Сітка  $20 \times 20$  вершин (для FEM –  $15 \times 15$  із відповідною нормалізацією).
2. Тривалість симуляції 3 с.
3. Сфера радіусом 1.0 у центрі сцени (колізія з тканиною).
4. Гравітація -9.8 уздовж осі Z.

Вимірювані характеристики:

1. FPS, час виконання (с).
2. Використання пам'яті (МБ).
3. Стабільність (у відсотках з урахуванням відсутності “вибухів” симуляції).
4. Максимальна деформація.
5. Енергія системи.
6. Точність обробки колізій (у відсотках).

Окрім того, проведено аналіз масштабованості за кількістю вершин (від 100 до 1600) та дослідження змін енергії в часі. Під час кожної симуляції фіксувалися усі наведені показники, а для отримання усереднених результатів експеримент повторювався 10 разів.

Візуальні спостереження. На рисунку 1 продемонстровано приклади візуалізації симуляцій тканини, отримані за допомогою різних методів. Усі моделі було побудовано при ідентичних початкових умовах (розмір сітки, гравітація, геометрія сфери тощо), що дало змогу порівняти особливості деформації та контакту з твердою поверхнею.

При симуляції тканини масово-пружинна методом можна спостерігати помірну деформацію полотна, а також певні коливання, зумовлені пружинною природою з'єднань вузлів. Сітка зберігає відносну цілісність, водночас забезпечуючи природні складки. Симуляція тканини методом позиційної динаміки показала жорсткішу поведінку полотна порівняно з масово-пружинним підходом. Завдяки геометричним обмеженням PBD формує чіткіші згини, а також краще контролює проникнення в поверхню сфери [13]. Гібридний метод поєднує швидкодію позиційної для глобальної деформації з локальним розв'язком більш точних обчислень. Візуально це проявляється у збалансованому характері згинів та відсутності значних “артефактів” при контакті зі сферою. Метод скінченних елементів повільно демонструє найдетальнішу деформацію за рахунок урахування складних механічних властивостей матеріалу. При цьому спостерігається менш виражена гнучкість у зоні кріплення, що може зумовлювати вищу жорсткість структури або необхідність зменшення кроку інтеграції для більш плавних результатів.

#### Результати досліджень

Основні показники продуктивності наведені у таблиці 1.

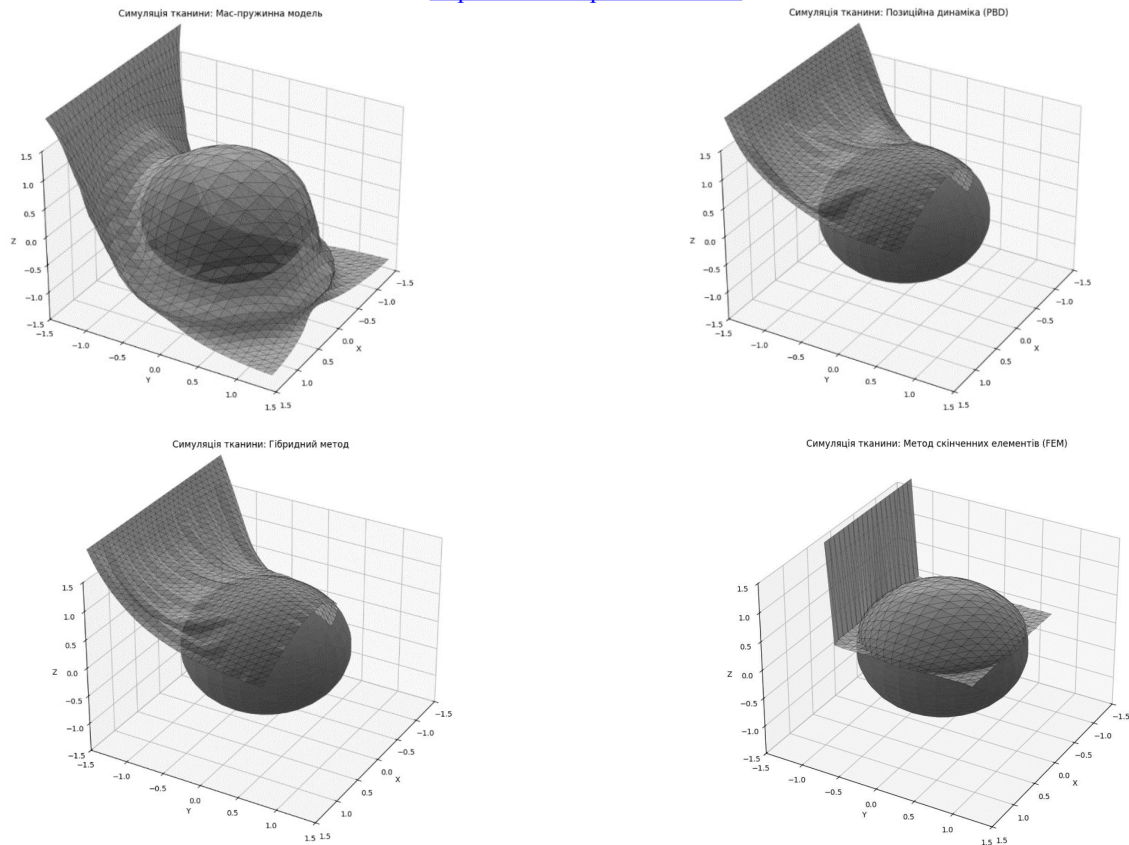
Таблиця 1 - Основні показники продуктивності методів симуляції тканини

Метод	FPS	Час виконання (с)	Пам'ять (МБ)	Деформація	Енергія
Mass-Spring	54.0	5.57	5.59	2.29	6318.8
PBD	28.6	10.53	1.88	0.14	3793.9
FEM	19.0	15.83	0.18	213.50	33629.5
Hybrid	36.5	8.24	1.47	0.15	3834.5

Отримані дані свідчать, що найбільше значення FPS у масово-пружинної моделі (54.0 FPS), що робить її придатною для реального часу. FEM (19.0 FPS) є найповільнішим, проте характеризується мінімальним використанням пам'яті (0.18 МБ). Hybrid (36.5 FPS) займає проміжне місце, пропонуючи помірний баланс між швидкодією та ресурсомісткістю.

При збільшенні кількості вершин із 100 до 1600 найбільше зниження FPS демонструє FEM, тоді як Mass-Spring зберігає високі показники продуктивності. Hybrid наближається до PBD при крупніших сітках. Це свідчить про те, що точніші обчислення FEM стають обчислювально неефективними за великих розмірів сітки, тоді як простіші моделі (Mass-Spring, PBD) чи їхнє гібридне поєднання здатні масштабуватися краще для інтерактивних задач.

На додаток до візуалізацій просторової деформації, наведені далі графіки ілюструють кількісні характеристики симуляції тканин для різних методів.



**Рис. 1 - Симуляція тканини: Масово-пружинна модель (Mass-Spring), Позиційна динаміка (PBD), Гібридний метод (Hybrid), Метод скінченних елементів (FEM).**

**Fig. 1 – Cloth Simulation: Mass-Spring Model, Position-Based Dynamics (PBD), Hybrid Method, and Finite Element Method (FEM).**

На рисунку 2а зображена зміна енергії системи протягом часу. Цей графік відображає динаміку зростання або зменшення загальної енергії системи за кроками симуляції. Як видно, *масово-пружинна модель (Mass-Spring)* характеризується швидким наростанням енергії, що може свідчити про менш ефективне демпфування або про накопичення внутрішніх напружень. *PBD* і *Hybrid* виявляють більш помірний темп збільшення енергії, тоді як *FEM* займає проміжну позицію, забезпечуючи відносно контрольований ріст енергетичних показників. Рисунок 2б демонструє порівняння методів симуляції тканини (радарна діаграма).

На радарній діаграмі представлено шість ключових параметрів: швидкість (FPS), стабільність, енергію системи, точність колізій, використання пам'яті та деформацію. Візуальне порівняння підтверджує, що *Mass-Spring* демонструє найвищу швидкість, але не завжди найкращу стабільність чи точність, тоді як *FEM* відзначається великою енергією і точністю, проте має нижчі показники швидкодії. *PBD* і *Hybrid* займають проміжні позиції, пропонуючи розумний компроміс між розглянутими показниками.

Порівняння продуктивності різних методів (рис. 2в). У цьому наборі стовпчикових діаграм наведено найбільш вагомні характеристики: FPS, час виконання, використання пам'яті, максимальну деформацію, енергію та точність обробки колізій. Масово-пружинна модель (54.0 FPS) виявилася найшвидшою, FEM – найповільнішою, але з найвищою максимальною деформацією (213.50) та мінімальними вимогами до пам'яті (0.2 МБ). *Hybrid* перебуває між згаданими крайніми варіантами за всіма параметрами, що підтверджує його збалансованість.

На рисунку 2г зображена масштабованість методів симуляції. Крива залежності FPS від розміру сітки (кількості вузлів) показує, що *FEM* швидко втрачає продуктивність при збільшенні деталізації, натомість *Mass-Spring* довго зберігає високі значення FPS. *PBD* і *Hybrid* виявляють тенденцію до плавного зниження швидкості у міру зростання розміру сітки, проте загальне зниження FPS у них менш радикальне, ніж у FEM.

На рисунку 2д Співвідношення швидкості та деформації. На двовимірній діаграмі показано, як корелюють показники FPS (на осі абсцис) і нормалізованої деформації (на осі ординат) для кожного методу. *FEM* досягає найвищої деформації, проте при цьому швидкість моделювання (FPS) є найнижчою. *Mass-Spring* має найбільше FPS, але з порівняно скромним рівнем деформації. *PBD* та *Hybrid* розташовуються між цими екстремумами, що знову підтверджує їх компромісний характер.

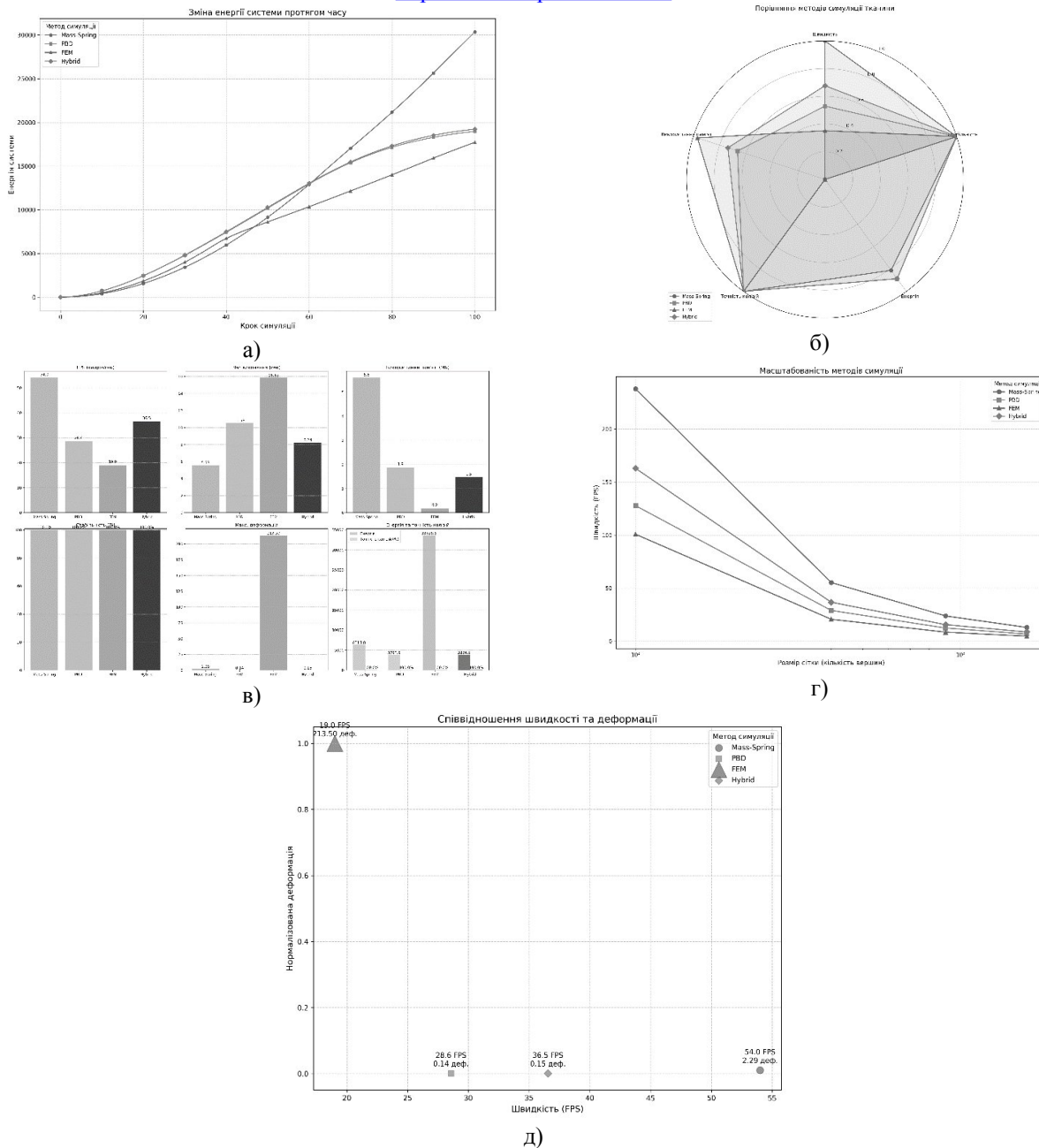


Рис. 2 - Порівняння методів симуляції тканини: а) зміна енергії системи в часі, б) радарна діаграма основних показників, в) порівняння продуктивності (FPS, час виконання, використання пам'яті тощо), г) масштабованість за розміром сітки, д) співвідношення швидкості та деформації.

Fig.2 – Comparison of cloth simulation methods: a) system energy over time, b) radar chart of key metrics, c) performance comparison (FPS, execution time, memory usage, etc.), d) scalability by mesh size, e) speed–deformation relationship.

Загалом, наведені графіки розкривають комплексну картину властивостей досліджених методів, даючи змогу оцінити як ефективність і швидкодію, так і точність та реалістичність симуляції тканин.

Таким чином, кожен метод має свої переваги: Mass-Spring вирізняється високим FPS, Hybrid – більшою фізичною коректністю, PBD – стабільністю та простотою оброблення колізій, а FEM – компромісом між швидкодією та точністю.

### Висновки

На основі реалізації чотирьох методів симуляції тканин (Mass-Spring, PBD, FEM, Hybrid) з уніфікованими налаштуваннями вдалося отримати низку важливих результатів. Порівняння продуктивності (FPS, час виконання), використання пам'яті, стабільності, максимальної деформації, енергії системи та точності колізій підтвердило, що кожен метод має характерні переваги й обмеження. Зокрема, Mass-Spring виявився найшвидшим, але поступається точністю складних деформацій; FEM гарантує високу реалістичність, однак є більш ресурсомістким; PBD забезпечує відмінну стабільність і простоту оброблення колізій; Hybrid поєднує частинкові та суцільні підходи, збалансовуючи швидкодію й точність.



Аналіз масштабованості при збільшенні сітки від 100 до 1600 вузлів засвідчив, що FEM швидко втрачає продуктивність, у той час як Mass-Spring залишається загалом ефективним. Hybrid та PBD у таких умовах виявилися компромісними рішеннями, зберігаючи прийнятний рівень продуктивності й достовірності. Порівняння отриманих результатів дає підстави рекомендувати Mass-Spring чи PBD для інтерактивних застосувань з великими сітками, а FEM — для локально складних ділянок, що потребують детального аналізу, або в межах гібридних підходів. У підсумку, найбільш перспективним для впровадження у віртуальні примірочні системи є комбіноване використання простих частинкових методів із вибірковою залученням FEM у зонах підвищених деформацій, що дає змогу отримати баланс між швидкістю та фізичною точністю.

#### Список використаних джерел

1. Bridson R. *Fluid Simulation for Computer Graphics*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 256 с.
2. Teran J., Sifakis E., Irving G., Fedkiw R. Robust quasistatic finite elements and flesh simulation // *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*. 2005. Article 4.
3. Müller M., Heidelberger B., Teschner M., Gross M. Meshless deformations based on shape matching // *ACM Transactions on Graphics*. 2005. Vol. 24, no. 3. P. 471–478.
4. Narain R., Samii A., O'Brien J. F. Adaptive anisotropic remeshing for cloth simulation // *ACM Transactions on Graphics*. 2012. Vol. 31, no. 6. Article 152.
5. Bender J., Müller M., Otaduy M. A. Position-Based Simulation Methods in Computer Graphics // *Computer Graphics Forum*. 2014. Vol. 33, no. 6. P. 228–251.
6. Macklin M., Müller M. Position Based Fluids // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2013. Vol. 32, no. 4. Article 104.
7. Li Y., Fu C. W., Tai C. L., Liu L. Cloth Simulation Using Geometric Constraints with Contact Consistency // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2021. Vol. 27, no. 11. P. 4269–4282.
8. Teran J., Sifakis E., Irving G., Fedkiw R. Robust quasistatic finite elements and flesh simulation // *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*. 2005. Article 4.
9. Wang H., O'Brien J.F., Ramamoorthi R. Data-driven elastic models for cloth: modeling and measurement // *ACM Transactions on Graphics*. 2011. Vol. 30, no. 4. P. 1–12.
10. Deul C., Chentanez N., Müller M. Hybrid Simulation of Deformable Solids // *Symposium on Computer Animation (SCA)*. 2022. P. 1–10.
11. Liu C., Narayanan V. Machine learning for cloth simulation: A survey // *Computer Graphics Forum*. 2022. Vol. 41, no. 2. P. 375–400.
12. Wang Z., Xu K., Wang J., Yu Y. Predicting cloth deformation in real-time using deep neural networks // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2020. Vol. 39, no. 4. Article 107.
13. Dojchinovski M., Pejic S., Milev M. Cloth Simulation using Position Based Dynamics and GPU Optimization // *2023 13th Conference on Intelligent Systems (IS)*. 2023. P. 199–205.
14. NVIDIA Developer. PhysX SDK Documentation. URL: <https://developer.nvidia.com/physx-sdk> (дата звернення: 20.03.2025).

#### References

- [1] R. Bridson, *Fluid Simulation for Computer Graphics*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- [2] J. Teran, E. Sifakis, G. Irving, and R. Fedkiw, “Robust quasistatic finite elements and flesh simulation,” in *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, 2005, Art. no. 4.
- [3] M. Müller, B. Heidelberger, M. Teschner, and M. Gross, “Meshless deformations based on shape matching,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 24, no. 3, pp. 471–478, 2005.
- [4] R. Narain, A. Samii, and J. F. O'Brien, “Adaptive anisotropic remeshing for cloth simulation,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 31, no. 6, Art. no. 152, 2012.
- [5] J. Bender, M. Müller, and M. A. Otaduy, “Position-Based Simulation Methods in Computer Graphics,” *Comput. Graph. Forum*, vol. 33, no. 6, pp. 228–251, 2014.
- [6] M. Macklin and M. Müller, “Position Based Fluids,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 32, no. 4, Art. no. 104, 2013.
- [7] Y. Li, C. W. Fu, C. L. Tai, and L. Liu, “Cloth Simulation Using Geometric Constraints with Contact Consistency,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 27, no. 11, pp. 4269–4282, 2021.
- [8] J. Teran, E. Sifakis, G. Irving, and R. Fedkiw, “Robust quasistatic finite elements and flesh simulation,” in *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, 2005, Art. no. 4.
- [9] H. Wang, J. F. O'Brien, and R. Ramamoorthi, “Data-driven elastic models for cloth: modeling and measurement,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 30, no. 4, pp. 1–12, 2011.
- [10] C. Deul, N. Chentanez, and M. Müller, “Hybrid Simulation of Deformable Solids,” in *Proc. SCA*, 2022, pp. 1–10.
- [11] C. Liu and V. Narayanan, “Machine learning for cloth simulation: A survey,” *Comput. Graph. Forum*, vol. 41, no. 2, pp. 375–400, 2022.
- [12] Z. Wang, K. Xu, J. Wang, and Y. Yu, “Predicting cloth deformation in real-time using deep neural networks,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 39, no. 4, Art. no. 107, 2020.
- [13] M. Dojchinovski, S. Pejic, and M. Milev, “Cloth Simulation using Position Based Dynamics and GPU Optimization,” in *Proc. 2023 13th Conf. Intelligent Systems (IS)*, 2023, pp. 199–205.
- [14] NVIDIA Developer, “PhysX SDK Documentation.” [Online]. Available: <https://developer.nvidia.com/physx-sdk>. [Accessed: Mar. 20, 2025].

Отримана в редакції 28.02.2025. Прийнята до друку 21.03.2025. Received 28 February 2025. Approved 21 March 2025. Available in Internet 28 March 2025.