ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 621:658.512.2.011.56 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.330

© К.А. Зіборов[1], Д.В. Лаухін[1], І.В. Вернер[1], О.М. Твердохліб[1]
[1] Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ПІД ЧАС ВИРІШЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАВДАНЬ ІНЖЕНЕРІЇ В ДИЗАЙН-ПРОЄКТУВАННІ

K. Ziborov[1], https://orcid.org/0000-0002-4828-3762
D. Laukhin[1], https://orcid.org/0000-0002-9842-499X
I. Verner[1], https://orcid.org/0000-0003-2427-3284
O. Tverdokhlib[1] https://orcid.org/0000-0002-1826-3664
[1] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

USE OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SOLVING TECHNICAL ENGINEERING TASKS IN DESIGN

Мета. Дослідити інструменти генеративного штучного інтелекту при проєктуванні інженерних виробів, що забезпечує автоматизований синтез раціональної форми за заданими граничними умовами, критеріями міцності та ефективності.

Методика. Потенціал інтерактивного моделювання пошуку форми виробу досліджується за допомогою аналізу і синтезу: розглядається концептуальний підхід до фіксованої форми, який діє як візуалізація взаємодіючих сил, та в подальшому пропонується модель технології виготовлення на основі існуючих обмежень. Розглядаються наслідки моделювання на основі аналізу стану розвитку виробництва для майбутніх напрямків еволюції виробу.

Результати. Використання генеративних можливостей інструментів автоматизації, забезпечених штучним інтелектом, дає можливість звільнити розробника для створення більш осмисленого дизайну, що забезпечує додаткову цінність кінцевого продукту. Показано, що інтеграція генеративного штучного інтелекту з FEM-верифікацією забезпечує нелінійне зростання інженерної ефективності (до 2,7 разів відносно базового параметричного підходу), тобто зміна топології має пропорційно більший вплив на міцність, ніж на масу. Доведено, що генеративний дизайн може виконувати не лише функцію автоматичної побудови форми, а є інструментом виявлення і формалізації конструктивних залежностей у системі процесів конфігурації, топології, масогабаритних характеристик та запасу міцності. Це дозволяє перейти від емпіричного перебору варіантів до керованого синтезу оптимальних конфігурацій з передбачуваним показником ефективності.

Наукова новизна. Вперше для задачі дизайн-проєктування велосипедної рами встановлено кількісну залежність між геометричними параметрами згенерованої топології, масою конструкції та фактором безпеки, що дозволило аналітично оцінити ефективність отриманих рішень у вигляді відношення коефіцієнту запасу міцності до маси.

Практична значимість. Використовуючи можливості генеративного штучного інтелекту можна значно прискорити процес проєктування, підвищити ефективність і точність розрахунків та дозволити розробникам інженерних виробів більше зосередитись на ідеях.

Ключові слова: *генеративний дизайн, форма виробу, топологічна оптимізація.*

Вступ. При вивченні теорії та методології проєктування різними дослідниками, дизайнерами та інженерами, як в академічних колах, так і в промисловості, було запропоновано безліч підходів щодо того, як повинно і можливо здійснювати проєктування. Ці пропозиції щодо проєктування тяжіли до того, що тепер називають філософією дизайну, моделями дизайну та методами дизайну [1, 2]. Розробки у сфері штучного інтелекту відкривають можливості створення більш досконалих інструментів дизайну [3]. Прикладом таких інновацій є інструменти генеративного дизайну, що дозволяють створювати складні та високопродуктивні продукти. Поєднання ескізування та генеративних алгоритмів дозволяє дизайнерам досліджувати різні ідеї та приймати більш обґрунтовані рішення на ранніх етапах проєктування.

Генеративний дизайн із використанням топологічної оптимізації розглядає об'єкт як розподіл певної кількості матеріалу для відповідності обраним критеріям. Такий підхід полягає у здатності автоматично знаходити оптимальні форми, що дозволяє заощадити матеріали та ресурси при збереженні необхідної міцності та функціональності об’єкта проєктування.

Кожне програмне забезпечення, яке використовується для створення об’єкта проєктування має свою архітектуру та ілюструє власну форму генеративності. Наприклад, в роботі [4] представлено багатоцільовий еволюційний алгоритм для дослідження дизайну та оптимізації профілю крила; багатоцільовий генетичний алгоритм (Autodesk) використовується в роботах [5, 6] при архітектурному плануванні простору та проєктуванні офісних столів; теорію автогенетичного проєктування використовували для проєктування коробки передач [7]. Таке розмаїття застосувань передбачає власну логіку проєктування, пов'язану з обраним програмним забезпеченням та умовами технічного завдання.

Метод топологічної оптимізації - це інноваційний підхід до проєктування та оптимізації структурних систем, який використовує обчислювальні методи визначення найбільш ефективної топології (форми) об'єкта з урахуванням заданих навантажень, граничних умов і обмежень. Саме за такого підходу майбутній інженер під час виконання кваліфікаційної роботи не займається багатоітераційним моделюванням та оцінкою початкових варіантів, а обрана САПР самостійно створює десятки моделей, порівнює їх між собою та відбирає добре оптимізовані модифікації. Завданням виконавця є визначення яким характеристикам повинні відповідати рішення, що генеруються системою. Впровадження такого підходу дозволить суттєво покращити якість проєктно-конструкторських робіт, значно прискорити розробку та освоєння нових технічних рішень, що є критично важливим для підтримки конкурентоспроможності та науково-технічного прогресу.

Мета роботи. Дослідження інструментів генеративного штучного інтелекту при дизайн-проєктуванні інженерних виробів на прикладі рами велосипеду з метою найкращого відношення міцності до маси у програмному пакеті Fusion 360.

Основна частина. Форми виробів у кількісних методах проєктування зазвичай виражаються математичними уявленнями, такими як вектори, дерева, графи та ін. Такі формальні уявлення обмежені з погляду реалістичності чи гнучкості, і це знижує їхню корисність для споживачів/замовників продукції, які зазвичай створюють очікувані форми виробів у просторі власного уявлення, іноді

обмеженому засобами (наприклад, начерками від руки) та їх когнітивними навичками (наприклад, креативністю та досвідом). Щоб підвищити цінність формальних уявлень для споживачів/замовників, при дизайн-проєктуванні [8] фізичних об'єктів більш ефективно представляти простір проєктного процесу у вигляді вибірок із статистичного розподілу форм виробу або його частини та оцінювати генеративну модель цього розподілу, використовуючи великий набір зображень та атрибутів дизайну різноманітних варіантів виробу (або його складової частини) за обраними критеріями. Цей підхід до статистичного подання інформації про виріб є одночасно гнучким та реалістичним і оцінюється за допомогою глибокої (багатошарової) генеративної моделі.

Хоча форма як продукт динамічного моделювання є важливим результатом проєктування, раніше більшість таких результатів отримувалось як інженерні рішення. В машинобудуванні скорочення прямих витрат за рахунок економії матеріалу, пов'язано з розмірами серій, де виграш у кілька грамів на одиниці виробу при виготовленні кілька тисяч одиниць означає зекономлені тони матеріалу, а при тривалості роботи в 10–25 років це ще й величезна економія ресурсів споживача відповідного типу промислової продукції. Адитивне виробництво дає змогу проєктувальнику на етапі 3-D моделювання створювати складні, легкі структури, які раніше було важко виготовити за допомогою існуючих технологій, що значно розширює можливості використання топологічної оптимізації.

Програмне забезпечення для топологічної оптимізації зазвичай містить інструменти для створення та редагування 3-D моделі, реалізації методів розрахунку, інтегрованих з тепловим, структурним або рідинним аналізом; інструменти для постобробки (згладжування, вдосконалення та перевірки можливості виготовлення) згенерованих/оптимізованих моделей. Особливістю Autodesk Fusion 360 є об'єднання всього процесу розробки продукту в хмарне середовище зі зручним інтерфейсом, яке надає широкі можливості при проєктуванні в інженерії. Autodesk Fusion 360 об'єднує CAD, CAM і CAE функціональність в одному програмному забезпеченні. Він включає інструменти для симуляції напруги, термічних аналізів та інших фізичних процесів.

В даній роботі цінність такого представлення продемонстровано на прикладі дослідження форми велосипедної рами. Використовуючи дані про форму виробу, ми можемо трансформувати конфігурацію даного елементу промислового виробу на різні типи та марки будь-якого транспортного засобу відповідного призначення, тим самим надаючи споживачам продукції потенційні можливості для розуміння нових реалістичних можливостей дизайну при збереженні необхідної міцності та функціональності структури. Наприклад, рама транспортного засобу має бути спроєктована так, щоб витримувати вагу тіла користувача, маючи легку конструкцію.

Перший етап дизайн-проєктування – це збір інформації та складання технічного завдання, на якому відбувається «знайомство» із замовником, обговорення його побажань, визначення стилістичних переваг, обсягу фінансування та функціональних вимог до об'єкту проєктування. Але якщо починати проєктування виробу, відштовхуючись від завдання лише його функціональності, то найчастіше виходить шаблонне рішення, не спрямоване на задоволення споживчого

очікування, а тільки на рішення конкретної виробничої задачі. Оригінальність же виробу проявляється в сукупності ознак, які зумовлюють його відмінність від виробів аналогічного призначення, матеріалів, техніки виконання [9]. Постановка задачі з урахуванням обмежень для інструментів генеративного дизайну таких як, точки кріплення коліс, сідла та руля велосипеда (зелений колір), а також (червоним кольором) відмічена зона заднього колеса та вісь для педалей та рульової вилки в якій не можуть розміщуватись інші частини механізму, запропоновано з урахуванням антропометричних показників замовника (рис. 1).

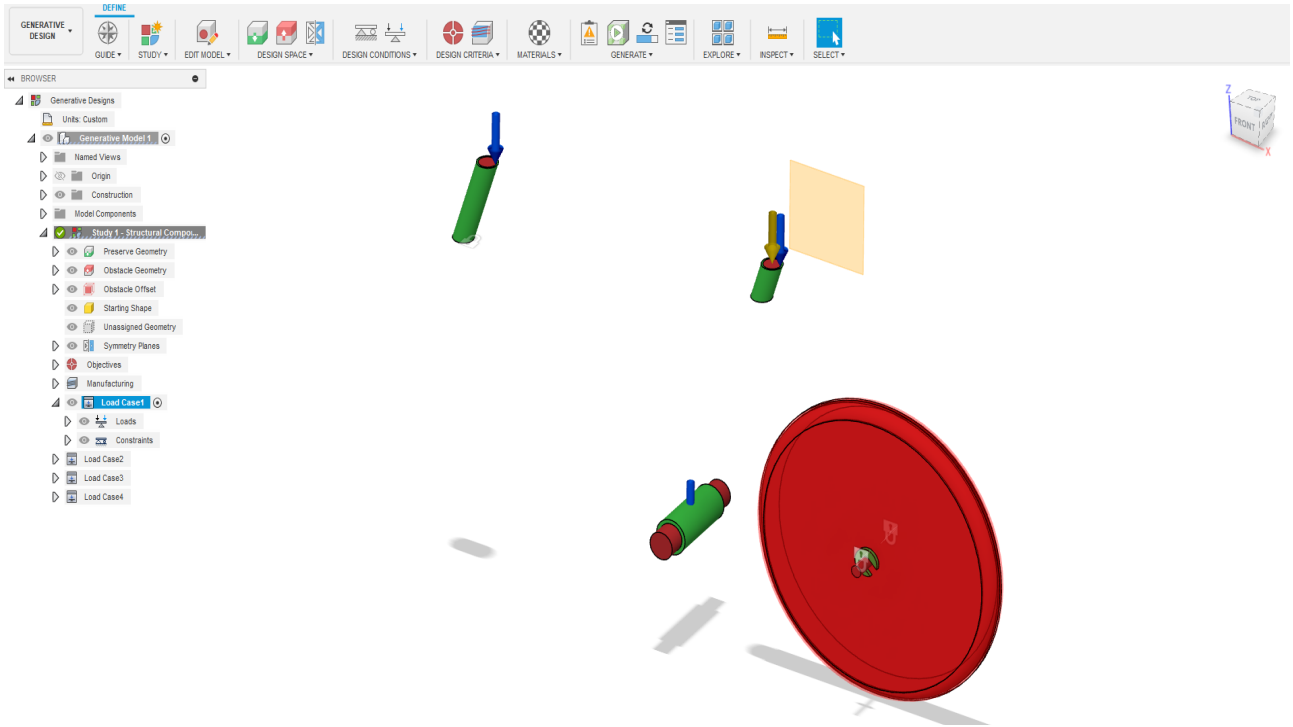


Рис.1. Початкові умови для виконання завдання
генеративного дизайну рами велосипеда

При проєктуванні розглянуто декілька варіантів навантаження (рис. 2): від режиму квазістатичного руху з керуванням з невеликими нахилами велосипедиста в різні боки до режиму динамічної їзди зі спиранням на педалі, що призводить до нерівномірного розподілу зусиль в точках кріплення рами.

На цьому етапі проєктування ідея використання генеративного штучного інтелекту полягає в тому, щоб швидко створити величезну кількість варіантів дизайн-проєкту, заснованих на єдиній концепції виробу. Такі параметри, як цілі, обмеження та матеріали, встановлюються розробником для управління генерацією всіх можливих варіантів рішення за допомогою тестування програмним забезпеченням на кожній ітерації. Для цього визначається цільова функція генерування 3D моделі (наприклад, мінімальна вага та фактор безпеки (аналог коефіцієнту запасу міцності)), а в діалоговому вікні вибору матеріалів обираються декілька матеріалів (рис. 3).

Використовуючи в процесі виконання роботи інструменти генеративного дизайну, було отримано 3D моделі рами велосипеда, деякі з них представлено на рисунку 4.

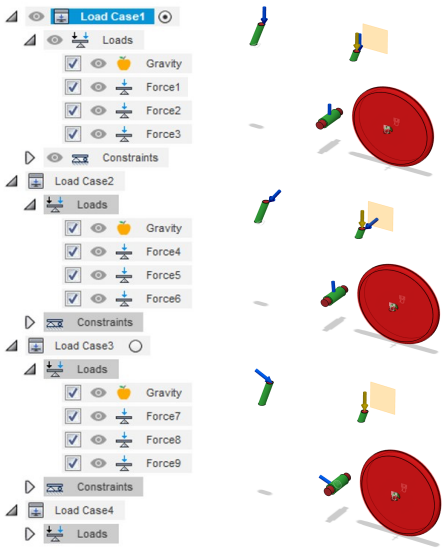


Рис. 2. Завдання режимів навантаження рами велосипеда

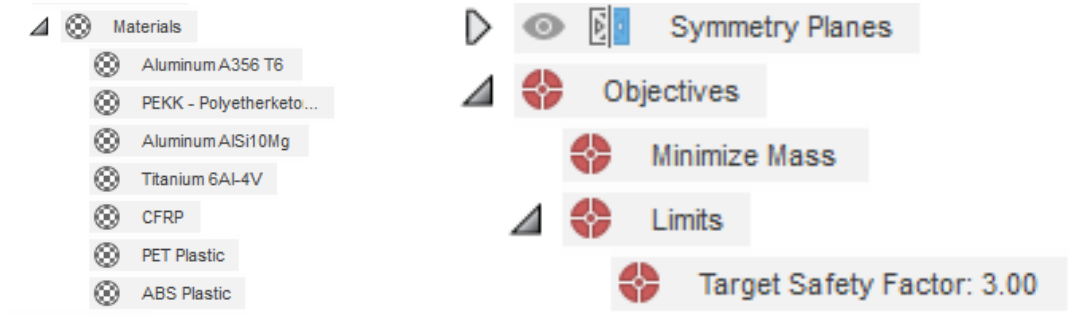


Рис. 3. Діалогові вікна вибору матеріалів
та цільової функції генеративного дизайну

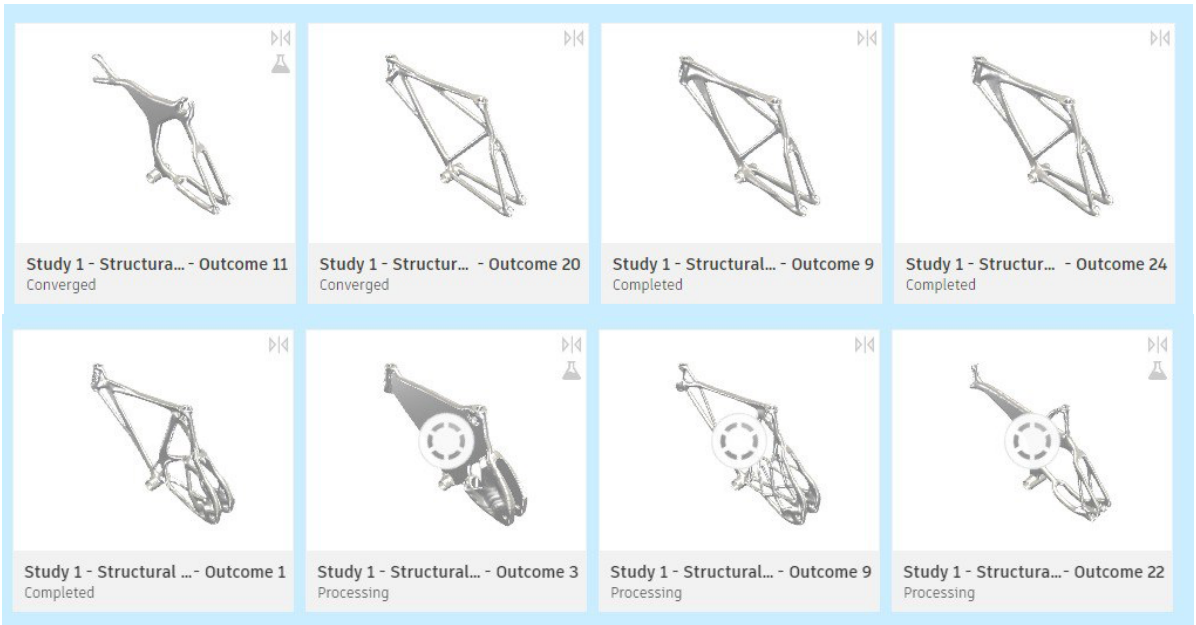


Рис.4. Вікно 3D моделей корпусу рами велосипеда, отриманих інструментами генеративного дизайну

При цьому розробник грає роль фахівця-наглядача, використовуючи ітеративні можливості штучного інтелекту для створення та тестування концепцій, які в такій кількості на цьому етапі проєктування було б практично неможливо реалізувати.

Для обраних критеріїв (див. рис. 3) в дизайн-проєктуванні рами велосипеда зручно скористатися залежністю за діаграмою залежності фактору безпеки від ваги конструкції (рис. 5). Наведений розподіл наочно демонструє які обрані матеріали мають найменший (PET ABC пластики), а які найбільший (титан) коефіцієнт запасу міцності. А найбільш успішними є варіанти, які Autodesk Fusion 360 рекомендує як найбільш вдалі результати позначкою «клас» з пальцем до гори (варіанти з карбону та алюмінію).

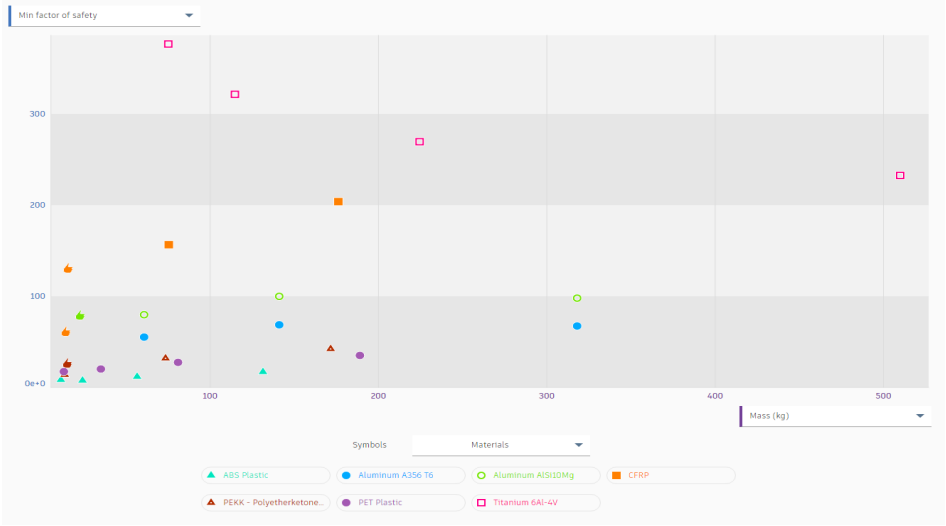


Рис. 5. Діаграма залежності фактору безпеки від ваги

Визначивши категорії обчислювальних характеристик, в подальшому представляється модель виробу, яка узагальнює існуючі симуляції за допомогою підходу, заснованого на обраних (або запропонованих замовником) обмеженнях (рис. 6).

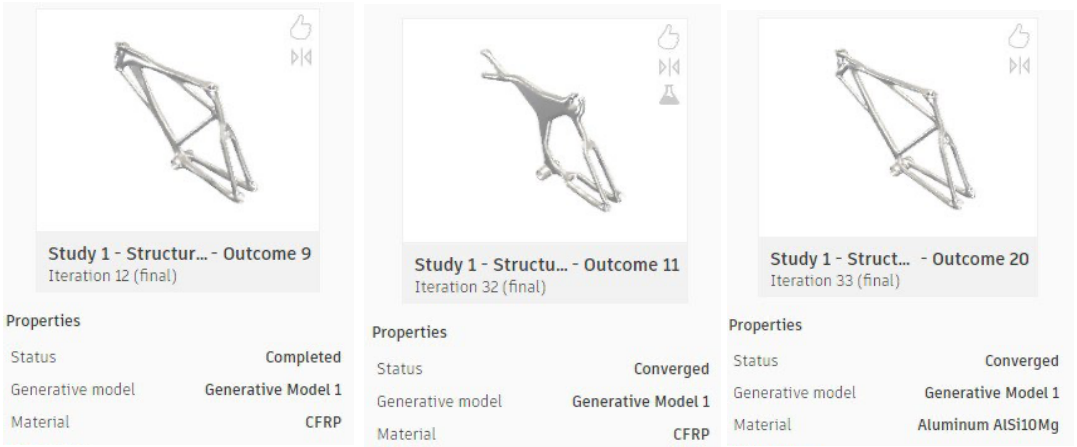


Рис. 6. Раціональні варіанти при дизайн-проєктуванні рами велосипеда згенеровані Autodesk Fusion 360

Геометрію рами, яку отримали в результаті такої оптимізації, треба перевіряти на відповідність тим же умовам, для яких вона проєктувалася. Важливо, щоб запропонована конструкція відповідала оригінальним специфікаціям технічного завдання та враховувала встановлені обмеження. У розглянутому прикладі аналіз необхідний, щоб переконатися, що фактор безпеки модифікованої форми рами був прийнятний при збереженні мінімальної ваги (рис. 7).

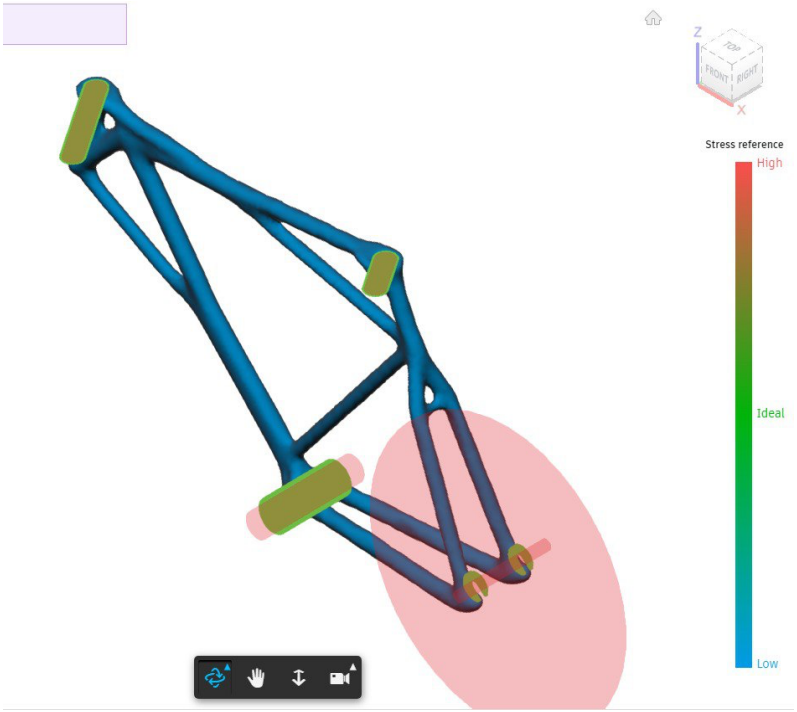


Рис. 7. Епюра фактору безпеки

Рама велосипеда виготовлена із стандартного вуглецевого волокна тієї ж товщини, що й алюмінієва матиме на 31 відсоток більшу жорсткість, ніж алюмінієва, і водночас важитиме на 50 відсотків менше та матиме на 60 відсотків більшу міцність. Деталь із вуглепластику має у 2–5 разів більшу міцність, ніж алюмінієва деталь тієї ж ваги. Деталь, виготовлена із стандартного карбону тієї ж товщини, що й алюмінієва, буде на 60% міцніша і вдвічі легша. Алюміній має більшу пластичність, що робить його менш схильним до пошкоджень від раптових ударів, а карбон може раптово зламатися під напругою або тиском.

Технологія виготовлення передбачає розміщення різної кількості шарів композиційного матеріалу навколо жорсткої моделі всередині прес-форми. Нагрів прес-форми розріджує смолу та формує препреги у форму кінцевого згенерованого інструментами Fusion виробу. Використовуючи різний за властивостями композиційний матеріал в одних місцях та більш м'який в інших, розробник може адаптувати призначення велосипеда.

Аналіз удосконалених конструкцій рами велосипеду за допомогою методу скінченних елементів підтверджує їхню функціональність і коректність отриманих результатів, що підкреслює важливість симуляції в інженерних процесах. Крім того, впровадження топологічної оптимізації в Autodesk Fusion 360

демонструє можливості програмного забезпечення щодо прискорення складних проєктувальних процесів, що дозволяє створювати легкі та високоефективні компоненти із сучасних матеріалів, адаптованих до технологій та конкретних вимог галузей.

За результатами проведеної генеративної оптимізації геометрії рами велосипеда в Autodesk Fusion 360 сформовано множину альтернативних конструкцій, що відрізнялися параметрами, питомою масою та запасом міцності. Як базову конфігурацію для порівняння прийнято традиційну алюмінієву конструкцію масою 1,60 кг, що відповідає типу серійних рам середнього класу. Генеративні алгоритми сформували 31 варіант структури, з яких для подальшого аналізу відібрано чотири, що продемонстрували найвищу ефективність за критерієм «міцність/маса».

Порівняння показало, що карбонова рама, згенерована інструментами штучного інтелекту під встановлені антропометричні обмеження та навантажувальні сценарії, забезпечила суттєве зменшення ваги при одночасному підвищенні запасу міцності. Так, для найкращої карбонової конфігурації маса становила 0,84 кг (-47% відносно базового значення), тоді як фактор безпеки за моделлю напружено-деформованого стану зріс з 1,9 до 2,7 (табл.). Отже, застосування генеративного проєктування забезпечило підвищення інженерної ефективності на 42% у перерахунку на відношення «міцність/маса».

Таблиця

Порівняльна характеристика варіантів топологічної оптимізації

Матеріал конструкції	**Маса рами, кг**	**Коєфіцієнт запасу міності ($К_м$)**	**Відносна оцінка ефективності $К_м$/маса, 1/кг**
Алюміній 6061-Т6	1.60	1.9	1.19
ABC / ПЕТ-композити (альтернатива)	1.45	1.4	0.97
Титан Grade 5 (високоміцний варіант)	1.28	2.3	1.80
Вуглецевий CFRP (генеративний оптимізований)	0.84	2.7	3.21

Додаткова перевірка оптимізованої геометрії методом скінченних елементів підтвердила стабільність отриманих результатів: максимальні еквівалентні напруження у небезпечних перерізах не перевищували 63–68% від допустимих для обраної композиційної системи при моделюванні режиму динамічної їзди із частковим навантаженням на педалі. Такий розподіл напружень свідчить про коректність вибору топології та підтверджує можливість подальшої технологічної адаптації моделі до виробництва.

Таким чином, генеративний штучний інтелект стає інструментом трансформації самого процесу проєктування: замість перебору варіантів – формується статистична множина рішень, з якої обирається конфігурація з найкра-

щим функціональним компромісом. У цьому контексті саме поєднання «генеративний дизайн+FEM-верифікація» створює нову методологію інженерної оптимізації, де результатом є не геометрія як така, а обґрунтована траєкторія еволюції конструкції відповідно до заданих критеріїв міцності, маси й технологічних обмежень.

Отримані числові результати підтвердили, що генеративна оптимізація дозволяє досягти суттєво кращих параметрів конструкції. Ефективність ($К_м$ /маса) зросла у 2,7 раза відносно базової алюмінієвої геометрії, що демонструє перевагу технічного рішення при застосуванні AI-генерації форми та FEM-верифікації. Таким чином, генеративний дизайн у поєднанні з методами числового аналізу формує новий рівень інженерного обґрунтування, де процес пошуку рішень трансформується у системну оптимізацію за формалізованими критеріями.

Висновки. Штучний інтелект безпремінно стає важливим інструментом у арсеналі інженерів при дизайн-проєктуванні промислових виробів. Мета використання штучного інтелекту в інструментах проєктування - створити кращий дизайн за рахунок усунення необхідності виконувати повторювані завдання або завдання низької цінності/креативності. При використанні інструментів автоматизації, забезпечених штучним інтелектом, є можливість звільнити розробника для створення більш осмисленого дизайну, що забезпечує додаткову цінність кінцевого продукту. Крім того, можна використовувати генеративні можливості інструментів автоматизації для посилення креативних здібностей проєктувальника, щоб створювати речі, які були б інакше недоступні. Використання методу скінчених елементів у поєднанні з продуктами Autodesk Fusion 360 дозволяє значно підвищити ефективність і точність інженерних розрахунків.

Перелік посилань

1. Lomas, J. D., & Xue, H. (2022). Harmony in design: A synthesis of literature from classical philosophy, the sciences, economics, and design. *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation, 8*(1), 5–64. https://doi.org/10.1016/j.sheji.2022.01.001
2. Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmead, D., Tessier, A., Glueck, M., & Khan, A. (2009). Physics-based generative design. In *Joining languages, cultures and visions: CAAD Futures 2009* (pp. 231–244). Les Presses de l'Université de Montréal.
3. Hatchuel, A., Le Masson, P., Thomas, M., & Weil, B. (2021). What is generative in generative design tools? Uncovering topological generativity with a C-K model of evolutionary algorithms. *Proceedings of the Design Society, 1*, 3419–3430. https://doi.org/10.1017/pds.2021.603
4. Byrne, J., Cardiff, P., Brabazon, A., & O'Neill, M. (2014). Evolving parametric aircraft models for design exploration and optimisation. *Neurocomputing, 142*, 39–47. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.04.004
5. Nagy, D., Lau, D., Locke, J., Stoddart, J., Villaggi, L., Wang, R., Zhao, D., & Benjamin, D. (2017). Project discover: An application of generative design for architectural space planning. In *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (SimAUD 2017)* (pp. 1–8). Society for Modeling & Simulation International. https://doi.org/10.22360/SimAUD.2017.SimAUD.007
6. Chen, X. A., Tao, Y., Wang, G., Kang, R., Grossman, T., Coros, S., & Hudson, S. E. (2018). Forte: User-driven generative design. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–12). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3173574.3174070
7. Wünsch, A., Schabacker, M., & Vajna, S. (2012). Designing a gearbox for a novel independently controllable transmission using the autogenetic design theory. In *Proceedings of the 9th International Workshop on Integrated Product Development*. Magdeburg, Germany.

8. Pismenkova, T., & Ziborov, K. (2021). Development of design thinking—A modern view on the training of masters of technical specialties on the experience of Dnipro University of Technology. *International Scientific Journal of Universities and Leadership, 2*(12), 22–34. https://doi.org/10.31874/2520-6702-2021-12-2-22-34
9. Burnap, A., Liu, Y., Pan, Y., Lee, H., Gonzalez, R., & Papalambros, P. Y. (2016). Estimating and exploring the product form design space using deep generative models. In *Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference: Volume 2A, 42nd Design Automation Conference*. ASME. https://doi.org/10.1115/DETC2016-60091

ABSTRACT

Purpose. To investigate generative artificial intelligence tools for the design of engineering products, enabling the automated synthesis of a rational form under specified boundary conditions and strength and efficiency criteria.

The methods. The potential of interactive modeling of product shape search is explored through engineering research: a conceptual approach to a fixed shape is considered, which acts as a visualization of interacting forces, and a manufacturing technology model is further proposed based on existing constraints. The implications of modeling based on the analysis of the state of production development for future directions of product evolution are considered.

Findings. Using the generative capabilities of automation tools powered by artificial intelligence frees the developer to create more meaningful designs that add value to the final product. It is shown that the integration of generative artificial intelligence with FEM verification provides a nonlinear increase in engineering efficiency (up to 2.7 times compared to the basic parametric approach), i.e. a change in topology has a proportionally greater impact on strength than on mass. It is proven that generative design can perform not only the function of automatic form construction, but is a tool for identifying and formalizing design dependencies of the type in the system of configuration processes, topology, mass-dimensional characteristics and safety factor. This allows us to move from empirical selection of options to controlled synthesis of optimal configurations with a predictable increase in efficiency.

The originality. For the first time, a quantitative relationship between the geometric parameters of the generated topology, the mass of the structure and the safety factor has been established for the design problem of a bicycle frame, which allowed analytically assessing the effectiveness of the obtained solutions in the form of the ratio of the safety factor to the mass.

Practical implementation. Using the capabilities of generative artificial intelligence, you can significantly speed up the design process, increase the efficiency and accuracy of calculations, and allow developers of engineering products to focus more on ideas.

Keywords: *generative design, product shape, topological optimization.*

дата першого надходження статті до видання	14.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	19.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. K. Ziborov, D. Laukhin, I. Verner, O. Tverdokhlib
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.