

БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

УДК 004.9:624.04(045)

DOI: 10.31649/2311-1429-2026-1-7-17

В. М. Андрухов

А. С. Потеха

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ АРМАТУРИ В КАРКАСНО-МОНОЛІТНОМУ БАГАТОПОВЕРХОВОМУ БУДІВНИЦТВІ З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ НА ОСНОВІ BIM ТЕХНОЛОГІЙ

Вінницький національний технічний університет

Арматура є одним із ключових матеріалів, що широко застосовуються у сучасному каркасно-монолітному домобудівництві. У даному дослідженні розглянуто підхід до оптимізації виготовлення елементів арматурно-стержневих виробів шляхом інтеграції технології Building Information Modeling (BIM) із візуальним програмуванням у середовищі Dypato. Практика різання та згнуття арматури безпосередньо на будівельному майданчику призводить до значних втрат матеріалу, що, своєю чергою, збільшує вартість робіт та негативно впливає на довкілля.

Для вирішення цієї проблеми було розроблено інтелектуальний скрипт Dypato, який забезпечує автоматизоване отримання детальної інтегральної інформації про залишки стержневої арматури, після виготовлення арматурно-стержневих виробів, у форматі 3D, а також даних календарного планування (4D) безпосередньо з BIM-моделі. На основі отриманих даних скрипт спрощує процес оптимізації використання залишків матеріалу, шляхом визначення раціональних комбінацій довжин різання арматурних стержнів, що підвищує можливість їх повторного використання та мінімізує обсяги відходів. Ефективність запропонованого підходу була перевірена на реальному житловому монолітному об'єкті. Оцінювання результатів здійснювалося за порівняльними показниками, зокрема кількістю зекономлених арматурних стержнів, зменшенням обсягів відходів і загальним рівнем економії коштів. Отримані результати підтвердили, що оптимізація процесу виготовлення арматурних елементів дозволяє суттєво скоротити матеріальні втрати та знизити вартість будівельної продукції.

Разом із тим встановлено, що ефективність методу залежить від типу (діаметру, класу) арматури та виду конструктивного елемента. Найбільш відчутний ефект було зафіксовано для арматурних стержнів середньої довжини та елементів типу ростверків. Запропонований підхід і розроблений інструмент роблять внесок у розвиток сталого будівництва та демонструють потенціал BIM-орієнтованих рішень для вдосконалення технології розкрою стержневих арматурних заготовок та оптимізації використання металевої арматури.

Ключові слова: BIM (Інформаційне моделювання в будівництві), Revit, армування, оптимізація конструкцій, Dypato, Python, MCE.

Стаття надійшла до редакції / Received 05.02.2026
Прийнята до друку / Accepted 23.04.2026
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Андрухов В. М., Потеха А. С.

Вступ

Сучасна галузь архітектури, інженерії, будівництва та експлуатації об'єктів (АЕСО) пропонує широкий спектр підходів – від традиційних методів до передових цифрових технологій – для вирішення завдань реалізації будівельних проєктів. Водночас проблема управління будівельними та демонтажними відходами залишається актуальною, особливо у контексті перероблення відходів житлового будівництва. Одним із ключових чинників зростання вартості проєктів у цьому аспекті є сталеві арматура, яка формує значну частку матеріальних витрат [1]. Значні обсяги відходів арматурних стержнів призводять до втрат, що обчислюються мільйонами доларів [2], а також мають негативний екологічний вплив через підвищені викиди вуглецю, пов'язані з виробництвом сталі.

Дослідження показують, що закупівля арматурної сталі може становити до 15 % загальної вартості будівельного проєкту [3]. У разі перевитрат бюджету на будівництво, не раціональний розкрій арматурних заготовок, призводить до необґрунтованих втрат арматури, що додатково збільшує загальні витрати ще приблизно на 5 %, та істотно погіршує економічні показники реалізації проєкту [4]. У зв'язку з цим значна кількість наукових досліджень спрямована на

зменшення втрат арматури, зокрема шляхом оптимізації не лише на етапі проектування, а й в процесі зведення будівельного об'єкту.

Останні наукові роботи у сфері сталевих армувань зосереджуються переважно на конструктивних аспектах будівельних проєктів із використанням BIM-технологій. Серед таких підходів варто відзначити методи виявлення колізій [6] та прогнозування конфліктів [7], оцінювання конструктивної безпеки [8], автоматизоване виготовлення арматури на основі формату Industry Foundation Classes (IFC) [9], методи розміщення та вилучення арматурних елементів [10]. Застосування концепції цифрових двійників (Digital Twins) у поєднанні з Інтернетом речей (IoT) відкриває нові можливості для моніторингу та оцінювання пошкоджень будівель під дією динамічних навантажень, що може стати основою для покращення методів оптимізації армування [11]. Додатково важливим аспектом є критичний аналіз аналітичних і числових моделей, що описують зчеплення між арматурою та бетоном, оскільки точність цих моделей дозволить додатково використати результати моделювання в визначенні металомісткості ще на стадії проектування [12]. Багатоваріантне моделювання методів підсилення залізобетонних конструкцій за допомогою програмних комплексів (наприклад, LIRA-SAPR) дає змогу оптимізувати проєктні рішення по армуванню на стадії інженерного аналізу, враховуючи передбачувані варіанти втрати несучої здатності залізобетонними елементами [13]. Відкритим питанням залишається поєднання оптимізаційних методів зменшення витрат арматури як під час проектування так і на будівельному майданчику

Слід відзначити, що існуючі комерційні рішення (наприклад, спеціалізовані модулі надбудови SOFiSTiK або сторонні ERP-системи) частково вирішують проблему розкритою. Проте такі комерційні рішення пропонують закриті алгоритми типу «чорний ящик». Закрита архітектура ускладнює їх гнучке налаштування під специфічні та мінливі умови конкретного будівельного майданчика, що знижує загальну ефективність їх застосування. Більшість академічних досліджень також базується на використанні традиційних інструментів BIM і здебільшого орієнтовані на стадію проектування. Наукова новизна даного дослідження полягає у розробленні прозорого та відкритого методу параметричної оптимізації. На відміну від закритих комерційних продуктів та зазначених теоретичних підходів, у даному дослідженні використано платформу візуального програмування Dynamo. Водночас у наявних дослідженнях недостатньо розкрито практичні аспекти впровадження подібної оптимізації, саме на етапі різання арматури на будівельному майданчику, а також вплив цифрової інтеграції на послідовність робочих процесів і загальну ефективність реалізації проєкту.

Метою статті є розроблення автоматизованого скрипту Dynamo для оптимізації використання арматури з використанням технології Building Information Modeling шляхом вилучення просторових даних третього виміру (3D) та календарно-часових даних четвертого виміру (4D) з метою підвищення ефективності реалізації будівельних проєктів. Для оцінювання запропонованого підходу було виконано дослідження, у межах якого розглянуто такі дослідницькі питання:

- яким чином процес виготовлення елементів арматурно-стержневих виробів може бути оптимізований для зменшення обсягів використання арматурної сталі;
- наскільки ефективною є запропонована оптимізація на практиці.

Постановка проблеми

Методологія дослідження, застосована у даній роботі, базується на чотирьох модульному підході до оптимізації процесу виготовлення елементів арматурно-стержневих виробів із використанням технології Building Information Modeling (BIM) у поєднанні з програмним інтерфейсом Dynamo API. Запропоновані модулі є тісно взаємопов'язаними та спрямовані на комплексне вилучення багатовимірних даних з BIM-моделі з метою зменшення матеріальних втрат і підвищення загальної економічної ефективності будівельного проєкту.

Для перевірки практичної результативності розроблених оптимізаційних скриптів було обрано реальний будівельний об'єкт, на прикладі якого здійснено валідацію за схемою-алгоритмом (рис.1).

Перший модуль був зосереджений на визначенні параметрів, необхідних для розроблення інтелектуального скрипту Dynamo. На цьому етапі було сформовано перелік входних даних, вузлів оброблення та вихідних результатів, а також ідентифіковано параметри, які відсутні у стандартному середовищі Revit і потребують додаткового створення. Ці параметри є ключовими в цілісній ідентифікації арматури, та подальшої коректної роботи методу.

Усі необхідні параметри, разом із зазначенням їх типу, формату та інших характеристик, наведено в таблиці 1.

Щоб забезпечити повторне використання цих параметрів в інших проєктах, доцільно застосовувати спільні параметри (Shared Parameters). Такий підхід реалізується шляхом додавання Shared Parameters у Revit, зокрема із залученням Microsoft Excel та вузла Parameter.CreateSharedParameter у Dynamo-скрипті, що дозволяє швидко створювати й переглядати перелік потрібних спільних параметрів.

Для виконання оптимізації використовувалися два типи вхідних даних:

- користувачькі (user-defined) параметри, які вводилися вручну;
- параметри 3D та 4D, що автоматично вилучалися з арматурної BIM-моделі за потреби.

Для введення користувачьких даних застосовувався інтерфейс, наведений на (рис. 2), який пропонував користувачеві задати виробничі довжини (у мм), а також визначити поточний і наступний номери тижнів. Окремо було необхідно визначити й вихідні дані, щоб надалі їх можна було включати у специфікації (schedules) та експортувати для потреб виготовлення арматури на будівельному майданчику. У середовищі Revit такі вихідні дані реалізуються як розрахункові параметри (Calculated Parameters), зокрема: Cut-Off Length (Production Length - Bar Length) та Min Length by Type.

Таблиця 1

Структура параметрів, визначених у середовищі Revit для оптимізації арматури

Назва параметра	Тип параметра	Формат / Одиниці	Приклад	Опис
Стандартна довжина	Користувачьке введення	Ціле число / мм	12000	Довжина арматурних стержнів, що постачаються з заводу.
Номер стержня	Користувачьке введення	Ціле число	2, 3, 4	Поточний номер тижня (коли формуються відрізки) та номер наступного тижня (коли вони використовуються).
Тип арматури	Вхідні дані моделі	Рядок (категорія)	A500C	Клас арматурного стержня.
Довжина стержня	Вхідні дані моделі	Ціле число / мм	6400	Необхідна довжина відрізаного арматурного стержня.
Тип хост-елемента	Вхідні дані моделі	Рядок	Пм-1	Тип конструктивного елемента, до якого належить арматура (плита, колона тощо).
Марка хост-елемента	Вхідні дані моделі	Рядок	J8	Унікальний код елемента в моделі для ідентифікації.
Кількість стержнів	Вхідні дані моделі	Ціле число	12	Унікальна кількість арматурних стержнів у межах одного елемента.
Довжина відрізка	Розрахунковий параметр	Ціле число / мм	5600	Довжина, що відрізається від стандартного стержня під час виготовлення.
Мінімальна довжина за типом	Розрахунковий параметр	Ціле число / мм	400	Мінімально допустима довжина для використання. Менші значення вважаються відходами.
Довжина відходів	Розрахунковий параметр	Ціле число / мм	5600	Довжина арматури, що вважається відходами після сортування.
Категорія відрізка	Розрахунковий параметр	Рядок (категорія)	Відходи, Коротка, Середня, Довга	Категорії арматури для сортування та зіставлення.
Категорія нового стержня	Розрахунковий параметр	Рядок (категорія)	Коротка, Середня, Довга	Категорії для класифікації нових арматурних стержнів.
Перероблений стержень	Розрахунковий параметр	Логічний (Boolean)	True / False	Визначає, чи виготовлений стержень із попереднього відрізка.
Донорський стержень	Розрахунковий параметр	Комбінований рядок	PC-J7-B/13.5	Вказує, з якого відрізка може бути використана арматура.
Наступний стержень	Розрахунковий параметр	Комбінований рядок	PC-J7-B/13.5	Показує, де наступного разу може бути використаний відрізок.

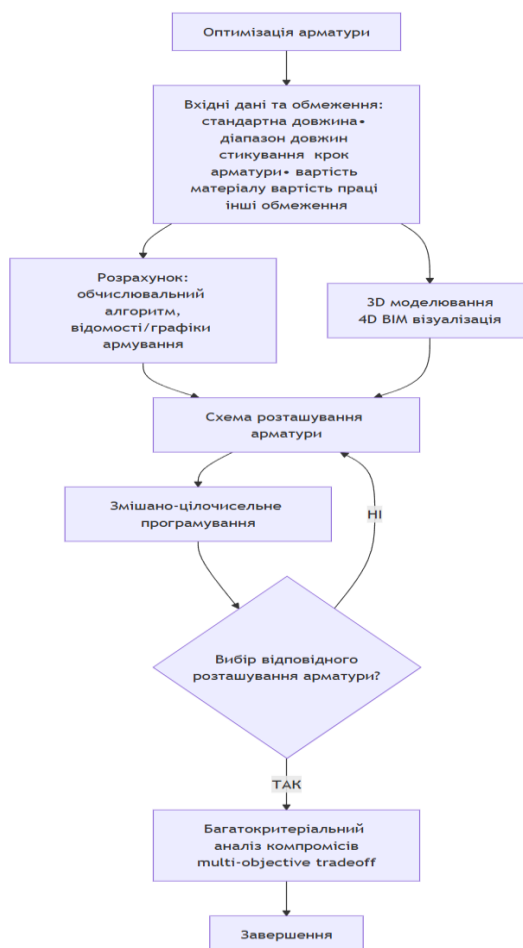


Рисунок 1 – Блок-схема процесу багатокритеріальної оптимізації

Для детальнішого розкриття логіки роботи запропонованого рішення на представлено розширену процесну модель, яка відображає повний потік параметричних даних (рис. 3).

Після визначення всіх необхідних параметрів було розроблено процесно-орієнтовану схему, що дозволяє наочно відобразити потоки інформації в межах запропонованого підходу. Під час різання арматурних стержнів у поточному тижні з виробничих довжин скрипт автоматично аналізував потреби у стержнях на наступні тижні з метою виявлення можливості повторного використання отриманих відрізків. У разі виявлення відповідностей виробничий графік виготовлення інформував виконавців про необхідність збереження відповідного відрізка для подальшого використання; за відсутності таких відповідностей відрізок класифікувався як відхід.

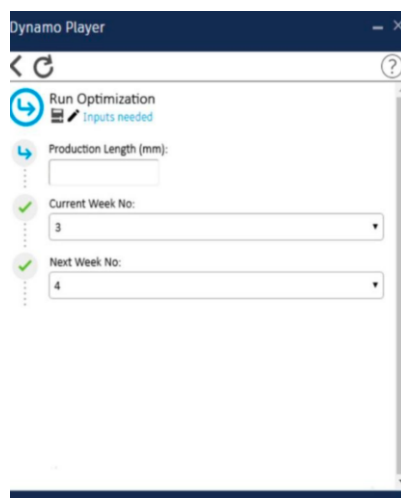


Рисунок 2 – Інтерфейс користувача для введення вхідних даних оптимізації у Dynamo

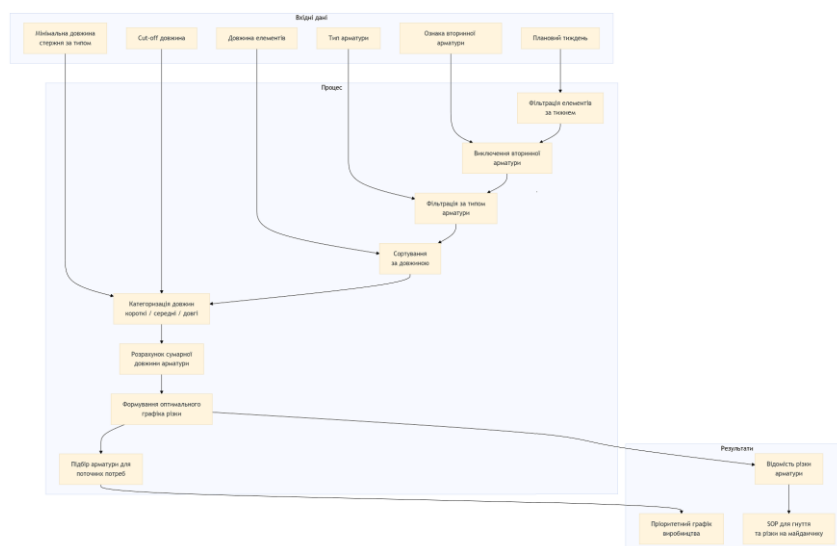


Рисунок 3 – Інтегрована data-driven платформа

Після виконання скрипту першим етапом було вибрано всі конструктивні елементи моделі (плити, балки, фундаменти тощо), для яких було задано відповідне значення тижня виконання робіт. За допомогою фільтра елементи поточного тижня було відокремлено від елементів наступного тижня, після чого арматура в межах кожної логічної гілки оброблення (thread) вилучалася для подальшого аналізу.

Для поточного тижня з переліку арматурних стержнів виключалися елементи, які вже були оптимізовані, тобто виготовлені з відрізків попереднього тижня. У гілці «наступного тижня» списки арматури сортувалися за довжиною з метою визначення мінімальних необхідних довжин для кожного типу арматури, наприклад 900 мм для T10 та 4100 мм для T12.

Для пошуку глобального мінімуму відходів зазвичай застосовують методи лінійного або цілочисельного програмування. Використання таких алгоритмів вимагає значних обчислювальних ресурсів. Спроба розв'язати задачу розкрою для великого масиву даних за допомогою глобальних методів (наприклад, оптимізація 10 000 арматурних стержнів для монолітного перекриття) призводить до критичного зниження продуктивності або зависання програмного комплексу.

Через високу обчислювальну складність глобальних методів було обрано спрощену схему «одного проходу». Цей метод є варіацією жадібного евристичного алгоритму, який виконує локальну оптимізацію: скрипт послідовно шукає найкращу пару з двох множин (поточного та наступного тижня) для кожної стандартної виробничої довжини. Такий підхід знижує обчислювальну складність до лінійного або логарифмічного рівня, що гарантує перерахунок BIM-моделі в режимі реального часу. Хоча локальна оптимізація може генерувати дещо більший відсоток відходів порівняно з глобальним оптимумом, швидкість і стабільність роботи алгоритму компенсують цей недолік у практичних умовах будівництва.

Процес розкрою за схемою «одного проходу» зводиться до мінімізації довжини залишку від стандартного стрижня після відрізання двох елементів. Цільова функція описує мінімізацію відходу:

$$W = L - (l_1 + l_2) \rightarrow \min \quad (1)$$

- Де, W - довжина залишку (відходу), який підлягає мінімізації;
 L — стандартна виробнича довжина арматурного стержня (наприклад, 12 м;
 l_1 — довжина стержня, необхідного для виконання робіт поточного тижня;
 l_2 — довжина стержня, необхідного для виконання робіт наступного тижня.

Обмеження математичної моделі:

- Сума довжин двох відрізків не може перевищувати стандартну виробничу довжину стержня
- Довжини стержнів вибираються з відповідних скінченних множин (пулів) необхідних деталей
- Умова невід'ємності (довжини деталей є строго додатними числами)

На наступному етапі виконувалося обчислення довжин відрізків поточного тижня шляхом віднімання фактичної довжини стержня з виробничої довжини, заданої користувачем. Отримані відрізки попередньо класифікувалися перед зіставленням з потенційними довжинами арматури для наступного тижня (рис. 4).

```

1  Вхідні дані:
2  L – стандартна виробнича довжина стержня;
3  D_1 – множина необхідних довжин деталей для поточного тижня;
4  D_2 – множина необхідних довжин деталей для наступного тижня;
5  W_min – мінімальна допустима довжина технологічного залишку (відходу).
6  P – множина згенерованих схем розкрою;
7  W_total – сумарна довжина відходів.
8
9  1: Ініціалізувати P = ∅
10 2: Ініціалізувати W_total = 0
11 3: Відсортувати елементи в D_1 та D_2 за спаданням довжини
12 4: Поки D_1 не є порожньою:
13 5:   Вибрати перший елемент l_1 з D_1
14 6:   Видалити l_1 з D_1
15 7:   Розрахувати первинний залишок: W_current = L - l_1
16 8:   Ініціалізувати l_2_selected = 0
17 9:   Якщо W_current >= W_min і D_2 не є порожньою:
18 10:     Знайти перший елемент l_2 в D_2, для якого виконується умова l_2 <= W_current
19 11:     Якщо елемент l_2 знайдено:
20 12:       l_2_selected = l_2
21 13:       Видалити l_2 з D_2
22 14:     Оновити залишок: W_current = W_current - l_2
23 15:   Кінець Якщо
24 16: Кінець Якщо
25 17: Додати запис (L, l_1, l_2_selected, W_current) до множини P
26 18: Оновити сумарні відходи: W_total = W_total + W_current
27 19: Кінець Поки
28 20: Повернути P, W_total

```

Рисунок 4 – Спрощена схема розкрою арматури «Один прохід»

Після класифікації розпочинався етап безпосереднього зіставлення. Скрипт формував до 42 окремих списків арматури залежно від номенклатури, що підлягала виготовленню протягом двотижневого періоду.

Застосування жадібної стратегії зумовлює виконання локальної оптимізації без повного перебору всіх можливих комбінацій. Вибір найбільшого доступного елемента з множини поточного тижня на початку кожної ітерації гарантує розміщення найбільш габаритних деталей. Такий вибір залишає менші залишки, які простіше заповнити дрібнішими елементами з множини наступного тижня. Зменшення обчислювального навантаження є необхідною умовою для забезпечення стабільної роботи скрипта в режимі реального часу під час взаємодії з масивами даних BIM-моделі.

Після виконання оптимізаційного алгоритму скрипт автоматично експортував відповідні дані виготовлення у вигляді набору електронних таблиць, що формувалися для кожного тижня окремо.

Процедура створення специфікацій у середовищі Revit є відносно простою з технічної точки зору. Водночас через значний обсяг даних, що відображаються одночасно, для забезпечення зрозумілості та практичної придатності інформації необхідно відбирати лише найбільш релевантні параметри, виконувати їх фільтрацію, групування, сортування, форматування та логічну організацію. Зазначений підхід до структурування даних ілюструється на (рис. 5).

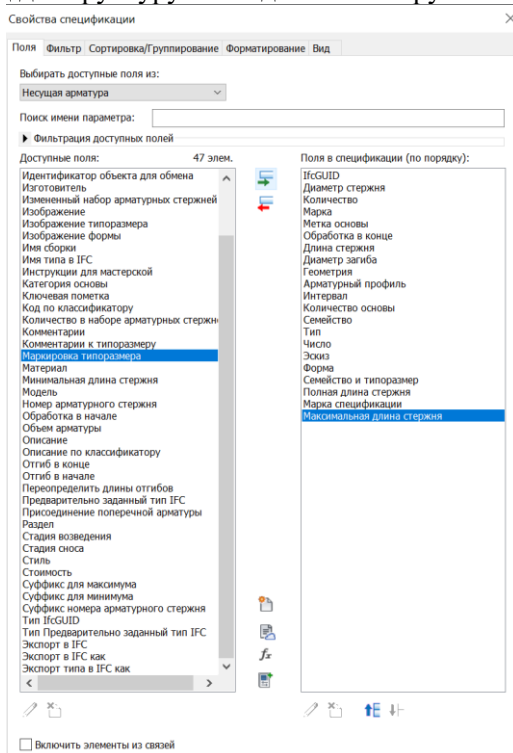


Рисунок 5 – Специфікація в Autodesk Revit

Першою експортованою специфікацією була відомість закупівель, яка використовувалася для визначення обсягів матеріалів, необхідних на відповідний тиждень. Оскільки вона охоплювала різні категорії конструктивних елементів (плити, балки, фундаменти тощо) та включала кілька типів матеріалів (наприклад, класи бетону, довжини арматурних стержнів), для її формування застосовувався багатокатегорійний підрахунок обсягів (multi-category take-off).

Ідентифікаційні дані (Identity Data) стосувалися інформації, що визначає просторове положення арматурних стержнів у межах проекту. До таких даних належали, зокрема, рівень розташування (наприклад, Lower Ground), категорія несучого елемента (Host Category, наприклад, Structural Column), тип несучого елемента (Host Type, наприклад, 500 × 500), його марка (Host Mark, наприклад, C23), а також координатна сітка (Gridline, наприклад, B/2).

Виробничі дані (Fabrication Data) описували безпосередній процес різання та гнуття кожного арматурного стержня у відповідну форму. Ключовим параметром у цьому блоці був показник Перероблений стержень (рис. 6), який визначав, чи слід використовувати нову виробничу довжину, чи відрізок, отриманий на попередньому тижні, відповідно до результатів оптимізації.

Наступним параметром був тип арматури, який визначав діаметр і клас стержня, що підлягав вибору з відповідного пулу (A500C тощо). У специфікації спочатку зазначалася довжина стержня, яку необхідно було відрізати від виробничої довжини. Далі вказувався діаметр згину, що визначав розмір згинального штифта, який необхідно встановити на арматурозгинальному верстаті для отримання потрібного радіуса згину. Лінійні розміри позначалися літерами A, B, C, D тощо, тоді як кути згину маркувалися цифрами 1, 2, 3 і 4.

Завершальним параметром у блоці виробничих даних була кількість у наборі (Quantity in Set), яка визначала кількість повторень операції різання та гнуття, необхідних для виготовлення повного комплекту арматурних стержнів відповідного типу.

Тип арматури	Розміщення стержня	Кількість	Крок	Перероблений Стержень	Вихідний стержень	Категорія	Довжина	Форма	Діаметр
A500C	Боковий	8	200	True	12/Пм-1/2/11500	Середня	7500		12

Рисунок 6 – Вибір матеріалу за запитом з метою мінімізації відходів, керований рішенням скрипту щодо використання нових або повторно застосованих арматурних стержнів

Дані розміщення (Розміщення стержня) охоплювали інформацію, що визначає положення арматурного набору безпосередньо в межах конструктивного елемента. Усі параметри цього блоку мали логічний (Boolean) характер, тобто задавалися у двійковій формі.

Дані оптимізації завершували структуру специфікації та відображали результати оброблення відрізків після операцій різання. У цьому блоці містився параметр, що вказував, чи відноситься кожен відрізок до відходів, чи є придатним для повторного використання в межах визначених пулів.

Перевірка оптимізаційного скрипту

З метою перевірки практичної придатності та ефективності застосування скриптів Dupaмо в реальних виробничих циклах було обрано конкретний проект житлової будівлі як дослідний приклад (рис. 7). У межах цього проекту арматурні стержні були систематизовані відповідно до типів конструктивних елементів, а для кожного з них було задано параметри, що відображали послідовність виконання будівельних робіт у часі.

Зокрема, влаштування фундаментної плити було заплановано на перший тиждень будівництва; стіни та колони - на другий тиждень; перекриття та балки - на третій тиждень, із подальшим аналогічним розподілом робіт для наступних етапів зведення. Така поетапна організація будівельного процесу дозволила чітко пов'язати параметри арматури з календарним графіком виконання робіт і створила необхідні умови для валідації розробленого оптимізаційного скрипту в BIM-орієнтованому середовищі.

Застосований підхід до календарного планування забезпечив можливість ефективно оцінки роботи скрипту Dymato на різних етапах будівництва, сприяючи кращій координації процесів і підтримці запланованих термінів виконання робіт.

Перед початком різання арматури кожній групі арматурних стержнів у тривимірній моделі було присвоєно унікальний ідентифікатор за допомогою Dymato. Така система нумерації забезпечила точне позиціонування арматури та однозначний зв'язок із відповідними конструктивними елементами, що полегшило процеси розподілу арматурних стержнів і створило основу для оптимізації подальших операцій різання. У результаті було спрощено логістику транспортування та монтажу на будівельному майданчику.

Необхідні типи арматурних стержнів для кожного тижня були відфільтровані безпосередньо з ВІМ-моделі, після чого виконувалося різання арматури відповідно до заданих розмірів.

Аналогічний підхід було застосовано й до визначення потреби в арматурі на наступні тижні будівництва. Шляхом порівняння нових запитів із наявними залишковими довжинами пріоритет надавався повторному використанню арматури там, де це було можливим, з метою мінімізації відходів.

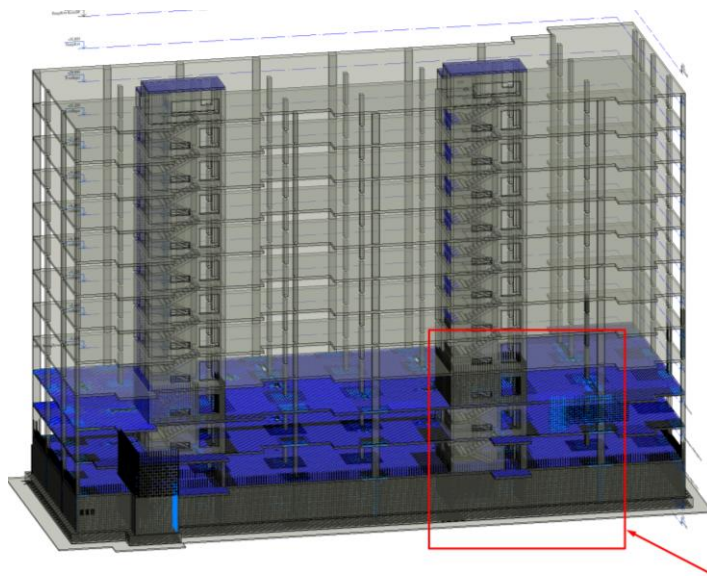


Рисунок 7 – Приклад блоку армування для дослідження

Зазначений аспект виявився науково значущим на завершальному етапі дослідного прикладу. У зв'язку з цим для перевірки практичної здійсненності даного підходу було проведено попередні випробування, які полягали у створенні арматурних стержнів лише для окремих категорій конструктивних елементів на основі наявної тривимірної ВІМ-моделі. Спочатку для декількох типорозмірів однієї категорії виконувалося обчислення оптимізованої довжини та вартості арматури. Відповідні числові результати наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Структура витрат на арматурну сталь для окремих типів конструктивних елементів				
Тип елемента	Тип арматури (Ø)	Загальна довжина (м)	Відходи арматури (м)	Економія коштів (грн)
1	2	3	4	5
Фундамент	8	79,52	2,24	1334,19
	12	71,69	0,32	
	14	109,76	15,38	
	18	44,8	3,2	
Балка	8	457,67	15,16	1666,86
	12	59,4	8,01	
	20	35,08	0,92	
	25	37,76	7,56	

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5
Колони	10	83,1	20,4	1751,69
	20	66,8	11,16	
	25	20,26	4,72	
Стіни	8	50,6	0,18	939,51
	10	454,22	55,78	
Плита	8	478,36	31,64	1211,73
	10	478,36	31,64	
Сходи	8	308,51	11,93	605,67
	10	91,6	28,4	
ЗАГАЛЬНА ЕКОНОМІЯ				7507,06

У межах даного дослідного прикладу шляхом визначення типів і довжин арматурних стержнів для різних конструктивних елементів було встановлено, що загальна потреба становить 351 арматурний стержень. Водночас після застосування оптимізаційного скрипту вдалося оптимізувати щонайменше 54 стержні, що відповідає зменшенню їх кількості на 15,48 % та забезпечує економію коштів у розмірі 7507,06 грн. Як показано в таблиці 2, найбільший економічний ефект досягається для елементів несучих колон, тоді як найменша економія спостерігається для сходових конструкцій.

Згідно з даними таблиці 3, шляхом аналізу вартості арматури для окремих конструктивних елементів різних типів можна отримати орієнтовну оцінку потенційної економії для елементів одного типу. У разі впровадження запропонованого підходу на всіх етапах і для всіх конструктивних елементів проєкту загальна економія може сягати 706 663 грн., що відповідає приблизно 14.5 % зниження загальної вартості проєкту.

Таблиця 3

Деталізований розподіл економії, в результаті успішного впровадження скрипта в проєкті

Тип елемента	Тип арматури (Ø)	Загальна маса (т)	Відходи арматури (т)	Економія коштів (грн)
Фундамент	8	9,09	1,09	110322,89
	12	45,22	3,01	
	14	16,65	2,35	
	18	7,14	2,26	
Балки	8	37,96	0,51	204018,4
	12	11,08	1,34	
	20	18,2	0,47	
	25	30,53	8,28	
Колони	10	38,33	9,67	219313,6
	20	76,76	10,38	
	25	39,88	5,4	
Стіни	8	0,6	0,002	18330,78
	10	8,41	1,03	
Плита	8	39,68	4,31	149158,5
	10	61,98	7,69	
Сходи	8	1,71	0,07	5522,4
	10	0,79	0,25	
ЗАГАЛЬНА ЕКОНОМІЯ				706663

Як показано в таблиці 2, для арматурних стержнів одного типу, незважаючи на те, що найбільш уживаними є діаметри 8 мм та 10 мм, саме для них спостерігається найбільша величина відходів арматури.

Перший підхід передбачає закупівлю арматурних стержнів різних типорозмірів стандартної довжини, де найбільш поширеними стандартними довжинами є 6 м, 9 м та 12 м. Якщо скрипт зможе визначати оптимальну стандартну довжину арматури для закупівлі на основі розрахованих довжин арматурних елементів та потреб кожного конструктивного компонента, це дозволить мінімізувати кількість відходів і обрати оптимальне рішення.

Висновки

У даному дослідженні було розроблено BIM-орієнтований метод оптимізації виготовлення елементів арматурних виробів з арматурно-стержневих заготовок, що базується на використанні багатовимірних даних моделі та візуального програмування. Запропонований підхід був валідований на прикладі, у межах якого було досягнуто суттєвої економії коштів у розмірі 706 663 грн.

У підсумку в даному дослідженні було розроблено BIM-орієнтований метод оптимізації, що використовує багатовимірні дані моделі та візуальне програмування з метою підвищення ефективності виготовлення елементів арматурних виробів з арматурно-стержневих заготовок та зменшення матеріальних відходів. По-перше, було запропоновано інтелектуальний скрипт Дунато, інтегрований із BIM-середовищем, який із залученням 4D-інформації календарного планування визначає оптимальні довжини різання арматурних стержнів. По-друге, запропонований метод було емпірично верифіковано на практичному кейсі, у межах якого досягнуто значної економії коштів і підтверджено його прикладну придатність.

Нарешті, попри те що поточна реалізація методу демонструє обнадійливі результати, вона водночас формує базову методологічну основу, відкриту до подальшого алгоритмічного вдосконалення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Umar U. A., Shafiq N., Ahmad F. A. A case study on the effective implementation of the reuse and recycling of construction & demolition waste management practices in Malaysia / *Ain Shams Engineering Journal*. – 2021. – Vol. 12, Issue 1. – P. 283–291. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.005>
- [2] Nical A. Optimization of reinforcement steel supply to precast concrete plants / *Arabian Journal of Geosciences*. – 2019. – Vol. 12. – Article 207. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4483-2>
- [3] Nigussie T., Chandrasekar M. K. Influence of rebar practice in the total cost of building construction projects: The case of Hawassa city, Ethiopia / *International Journal of Engineering Science and Technology*. – 2020. – Vol. 12, Issue 2. – P. 54–65.
- [4] Hu Y., Castro-Lacouture D. Clash relevance prediction based on machine learning / *Journal of Computing in Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 33, Issue 4. – Article 04018060. – DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000806](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000806)
- [5] Liu P., Feng L., Wu W., Li D., Chen Y. F. Automated clash resolution for reinforcement steel design in concrete frames via Q-learning and building information modeling / *Automation in Construction*. – 2020. – Vol. 112. – Article 103062. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103062>
- [6] Liu Y., Li M., Wong B. C. L., Chan C. M., Cheng J. C. P., Gan V. J. L. BIM-BVBS integration with openBIM standards for automatic prefabrication of steel reinforcement / *Automation in Construction*. – 2021. – Vol. 125. – Article 103654. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103654>
- [7] Lien L.-C., Dolgorsuren U. BIM-based steel reinforcing bar detail construction design and picking optimization / *Structures*. – 2023. – Vol. 49. – P. 520–536. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.009>
- [8] Liu P., Qi H., Liu J., Feng L., Li D., Guo J. Automated clash resolution for reinforcement steel design in precast concrete wall panels via generative adversarial network and reinforcement learning / *Advanced Engineering Informatics*. – 2023. – Vol. 58. – Article 102131. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102131>
- [9] Tan Y., Xu W., Chen K., Deng C., Wang P. An interactive and collaborative augmented reality environment for civil engineering education: Steel reinforcement bars teaching as an example / *Engineering, Construction and Architectural Management*. – 2024. – Vol. 31, Issue 6. – P. 1100–1122. – DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2022-0947>
- [10] Khant L. P., Widjaja D. D., Kwon K., Kim S. A BIM-based bar bending schedule generation algorithm with enhanced accuracy / *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, Issue 5. – Article 1207. – DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings14051207>
- [11] Kaliukh Iu., Slyuserenko Yu., Marienkov M., Siedin V., Tytarenko, V., Kovba V., Kosheleva N., Kurash S., Yakovenko I., Usenko M., Zhemelinsky I., Kliuiev V., Berchun Ya. (2025). Application of Digital Twins and IoT for investigating damage caused to buildings under dynamic influences. *Proceedings of the fib Symposium n Antibes*, pp. 3100–3111.
- [12] Yakovenko I.A., Dmytrenko Ye.A., Bakay T.V., Denysenko D.O., Pochka K.I. Critical analysis of analytical and numerical models of bond between reinforcement and concrete. *Strength of Materials and Theory of Structure: Scientific and technical collected articles*. 2025. Issue 115, pp. 244–261.
- [13] Dmytrenko, Y., Yakovenko, I., Kostyra, N., Tomashevsky, A. (2025). Variant Modelling of Strengthening Methods of the Reinforced Concrete Bending Structures Using the “LIRA-SAPR” Tools. In: Zabulonov, Y., Peer, I., Zheleznyak, M. (eds) *Liquid Radioactive Waste Treatment: Ukrainian Context. LWRT 2023. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 712. Springer, Cham., pp. 62–76. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95663-8_7

Андрухов Валерій Михайлович – к.т.н., доцент, Вінницький національний технічний університет, e-mail: vmandruchov@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4749-8569

Потеха Андрій Сергійович – аспірант I курсу, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: apotexa67@gmail.com. ORCID: 0009-0008-8187-1049

V. M. Andruchov
A. S Potiekha

OPTIMIZATION OF REINFORCEMENT COSTS IN FRAME– MONOLITHIC MULTI-STOREY CONSTRUCTION USING BIM-BASED MULTI-CRITERIA ANALYSIS

Vinnytsia National Technical University

Reinforcing steel is one of the key materials widely used in modern construction. This study investigates an approach to optimizing the fabrication of reinforcing bars through the integration of Building Information Modeling (BIM) technology with visual programming in the Dynamo environment. The common practice of cutting and bending reinforcement directly on construction sites leads to significant material waste, which in turn increases project costs and negatively impacts the environment.

To address this issue, an intelligent Dynamo script was developed to automatically extract detailed three-dimensional (3D) spatial information about reinforcement, as well as four-dimensional (4D) scheduling data, directly from the BIM model. Based on the extracted data, the script performs material optimization by determining rational cut-off lengths for reinforcing bars, thereby increasing the potential for material reuse and minimizing waste generation. The effectiveness of the proposed approach was validated through real-world engineering case studies. The evaluation was conducted using comparative indicators, including the number of saved reinforcing bars, the reduction in waste quantities, and the overall cost savings achieved.

The results confirm that optimizing the rebar fabrication process can significantly reduce material losses and lower construction costs. At the same time, it was found that the effectiveness of the method depends on the type of reinforcement and the type of structural element. The most pronounced benefits were observed for medium-length reinforcing bars and for structural elements such as column. The proposed approach and the developed tool contribute to the advancement of sustainable construction practices and demonstrate the potential of BIM-based solutions for improving the design of reinforced concrete structures and optimizing material utilization.

Keywords: BIM, Revit, optimization of constructions, Dynamo, Python, reinforcing, FEA.

Andruchov Valeriy Mykhailovych – PhD, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, e-mail: vmandruchov@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4749-8569.

Andriy Serhiiovych Potiekha – student, Department of Civil and Environmental Engineering Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia city. e-mail: apotexa67@gmail.com. ORCID: 0009-0008-8187-1049.