

МЕТОДОЛОГІЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ФОРМУВАННЯ СХЕМ АРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МСЕ

Вінницький національний технічний університет

Анотація У роботі запропоновано метод автоматизованого підбору робочого й додаткового армування залізобетонних плит на основі ізополів потрібної площі арматури, отриманих з розрахунку методом скінченних елементів. Описано алгоритм перетворення безперервних полів армування у дискретну сітку стрижнів із урахуванням нормованих діаметрів, кроків та конструктивних обмежень. Показано інтеграцію запропонованого підходу з BIM-моделлю для формування 3D-армування та специфікацій. Розглянуто можливість використання методів машинного навчання для оцінки якості схем армування та їх оптимізації.

Ключові слова: BIM, Автоматизація проектування, машинне навчання, оптимізація конструкцій, Autodesk Revit, MCE.

Abstract The paper presents a method for automated selection of main and additional reinforcement in reinforced concrete slabs based on reinforcement isofields obtained from finite element analysis. A deterministic algorithm converts continuous fields of required steel area into discrete reinforcement strips, considering bar diameters, spacing and code provisions. The approach is integrated with a BIM model to generate 3D rebar and schedules. The potential use of machine learning to evaluate and improve reinforcement layouts is outlined.

Keywords: BIM, machine learning, structural optimization, Autodesk Revit, Python, BIM, FEA

Вступ

Проектування залізобетонних плит за результатами розрахунку методом скінченних елементів (МСЕ) супроводжується необхідністю інтерпретації ізополів зусиль або потрібної площі арматури та перетворення їх у конкретну схему стрижнів. На практиці це здебільшого виконується вручну: інженер переглядає карти армування, поділяє плиту на ділянки, приймає крок і діаметр стрижнів, перевіряє конструктивні вимоги й коригує рішення. Такий підхід є трудомістким, суб'єктивним та часто призводить до перевитрати сталі або локального недоармування.

Сучасні дослідження з оптимізації армування плит демонструють, що поєднання МСЕ з алгоритмами оптимізації дозволяє зменшити витрати матеріалів і трудомісткість розрахунків [5–7]. Паралельно розвиваються BIM-технології, які забезпечують безперервний ланцюг від розрахункової моделі до детального 3D-армування та специфікацій [9]. У роботах, присвячених автоматизованому армуванню в BIM-середовищі, основна увага зосереджується на балках і колонах, тоді як для плит типові рішення переважно залишаються напівавтоматизованими [6,10].

Водночас поширення підходів «data-driven design» у проектуванні створює передумови для використання ізополів армування як первинних даних для алгоритмічного формування сітки арматури та її подальшого удосконалення засобами машинного навчання [8].

Метою даної роботи є обґрунтування доцільності впровадження методу автоматизованого підбору армування плит на основі ізополів армування, опис алгоритмічних рішень, підготовки даних та інтеграції з BIM-моделлю.

Постановка задачі та доцільність методу

Розглядається багатопрольотна залізобетонна плита, розрахована в програмному комплексі МСЕ. Результатом розрахунку є поле потрібної площі арматури $A_{s,req}(x,y)$ для верхньої й нижньої арматури в обох напрямках. Завдання алгоритму - перетворити це безперервне поле в набір дискретних смуг армування з заданими діаметрами, кроком та довжиною стрижнів, узгоджених з вимогами норм та конструктивними обмеженнями (мінімальне анкерування, відстані до отворів, ступінчаста зміна сітки тощо).

Доцільність такого методу полягає в:

- зменшенні часу, який інженер витрачає на ручну інтерпретацію ізополів;
- зниженні ризику локальних перевантажень через людський фактор;
- можливості цілеспрямованої оптимізації витрат арматури (мінімізація маси при дотриманні вимог міцності та тріщиностійкості);
- забезпеченні безшовного переходу від розрахункової до BIM-моделі без дублювання роботи.

Алгоритмічний підхід

Запропонований підхід передбачає двоступеневу процедуру. На першому, детерміністичному етапі виконується перетворення поля $A_{s,req}$ у попередню схему армування. Плита дискретизується на смуги вздовж головних напрямків арматури. Для кожної смуги усереднюється вимога до $A_{s,req}$, після чого алгоритм підбирає діаметр і крок стрижнів із доступного ряду, використовуючи просту оптимізаційну процедуру (наприклад, перебір комбінацій із мінімізацією різниці між $A_{s,prov}$ та $A_{s,req}$ з урахуванням запасу).

Для ділянок з підвищеними вимогами до армування (над опорами, в зонах концентрації моментів) формується додаткова арматура у вигляді вставних смуг або зон локального ущільнення кроку. Алгоритм контролює плавність переходів між ділянками, обмежуючи зміну кроку або діаметра на задану величину, що відповідає конструктивним вимогам.

На другому етапі передбачається використання моделей машинного навчання для покращення отриманих схем. Формується навчальна вибірка, де кожній елементарній ділянці плити (комірці сітки) відповідають: значення $A_{s,req}$, моменти, відстані до опор та отворів, обрані параметри армування й оцінка якості рішення експертом у діапазоні 0-1. На основі цих даних тренується модель (наприклад, градієнтний бустинг або нейронна мережа), яка вчиться прогнозувати «якість» місцевого рішення та пропонувати корекцію (зміна кроку, діаметра, довжини додаткових стрижнів). Подібні ML-підходи вже продемонстрували ефективність у задачах оптимізації елементів і прогнозування експлуатаційних характеристик залізобетонних конструкцій [7].

Підготовка даних та інтеграція з BIM

Для практичної реалізації методу ключову роль відіграє коректна передача результатів МСЕ в BIM-середовище. Необхідно забезпечити:

Експорт полів армування. Розрахункова програма експортує сітку значень $A_{s,req}$ у форматі CSV/JSON із координатами вузлів або центроїдів комірок.

Прив'язку до геометрії BIM-моделі. За допомогою Dynamo/Grasshopper координати сітки трансформуються в локальні системи плит Revit/іншого BIM-ПЗ, виконується зіставлення з контурами плит і їхніми отворами.

Формування 3D-армування. На основі оптимізованих смуг алгоритм генерує стрижні відповідних типорозмірів як елементи арматури в BIM-моделі, автоматично призначаючи їм марки, класи сталі та робочі параметри.

Документування та перевірка. BIM-модель використовується для формування специфікацій та креслень, а також для додаткових перевірок (колізії, мінімальні відстані, технологічність монтажу).

У такому підході BIM-модель виступає єдиним джерелом даних, у якому поєднуються результати розрахунку, оптимізована схема армування та документація, що відповідає концепції «data-driven design» у проектуванні залізобетонних конструкцій[8].

Висновки

Запропоновано концепцію методу автоматизованого підбору армування залізобетонних плит на основі ізополів потрібної площі арматури, отриманих з МСЕ-розрахунку. Показано, що поєднання детерміністичного алгоритму перетворення полів армування у смуги стрижнів з подальшим удосконаленням рішень засобами машинного навчання дає змогу знизити трудомісткість роботи інженера та потенційну перевитрату сталі. Інтеграція методу з BIM-моделлю забезпечує безперервність даних від розрахунку до випуску документації, підвищуючи керованість, відтворюваність і прозорість процесу проектування плитних конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кишкан А., Кархут, І. (2024). ПОТЕНЦІАЛ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ПРИСКОРЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ. Матеріали конференцій МЦНД, (17.05.2024; Ужгород, Україна), 354–358. вилучено із <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/article/view/1231>
2. Лялюк, О. Г., Осипенко, Р. С., & Мельник, Д. О. (2024). СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЕКТАХ НА ОСНОВІ МЕРЕЖ БАЙЄСА. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 36(1), 96–102. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-96-102>
3. Лялюк, О. Г., & Осипенко, Р. С. (2023). ОСОБЛИВОСТІ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В БУДІВНИЦТВІ. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 35(2), 172–176. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-172-176>
4. Сьомко П., Левус Є. (2024). ВИКОРИСТАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АРХІТЕКТУРНОГО СТИЛЮ БУДІВЕЛЬ. Матеріали конференцій МНЛ, (17 травня 2024 р., м. Київ), 346–347. Вилучено з <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/article/view/964>
5. Eleftheriadis S., Mumovic D., Greening P. Automated specification of steel reinforcement to support low carbon construction // Automation in Construction. 2018. Vol. 92. P. 182–194. Вилучено з: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092658051830414X?>
6. Borges M. M. BIM Modelling Automation on Reinforcement Detailing of Slabs: MSc thesis. University of Minho, 2018. Вилучено з: <https://core.ac.uk/download/pdf/161253402.pdf?>
7. Stochino F., Mistretta F. Reinforced Concrete Slab Optimization with Simulated Annealing // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, 3161. https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3161?utm_source=chatgpt.com
8. Brown N. C., Kannon D., Mueller C. Implementing data-driven parametric building design with uncertainty // Automation in Construction. 2020. Vol. 118, 103264. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092658051931297X?>
9. Sherif M., Elbeltagi E., Amer M. Automated BIM-based structural design and cost optimization // Scientific Reports. 2022. Vol. 12, 22071.
10. Widjaja D. D., Rachmawati T. S. N., Kim S. A BIM-based intelligent approach to rebar layout optimization for reinforced concrete columns // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 99, ScienceDirect

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

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

A. S Potiekha
V. M. Andrukhov

METHODOLOGY OF AUTOMATED FORMATION OF REINFORCEMENT SCHEMES FOR REINFORCED CONCRETE SLABS USING FEM RESULTS

Vinnytsia National Technical University;

Abstract *The paper presents a method for automated selection of main and additional reinforcement in reinforced concrete slabs based on reinforcement isofields obtained from finite element analysis. A deterministic algorithm converts continuous fields of required steel area into discrete reinforcement strips, considering bar diameters, spacing and code provisions. The approach is integrated with a BIM model to generate 3D rebar and schedules. The potential use of machine learning to evaluate and improve reinforcement layouts is outlined.*

Keywords: *BIM, machine learning, structural optimization, Autodesk Revit, Python, BIM, FEA*

Andriy Serhiiiovych Potiekha – Phd student, Department of Civil and Environmental Engineering Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia city. ORCID: 0009-0008-8187-1049

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