

Ю. В. Максим'юк, О.В.Авдійчук, Д. В. Лук'янчук

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ У ПРОЄКТУВАННІ МЕХАНІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОСТІ

Дослідження присвячене моделюванню динамічних систем у проєктуванні механічних конструкцій. Встановлено ефективність інтеграції параметричних і адаптивних підходів, що підвищують довговічність, стійкість і енергоефективність конструкцій. Запропоновано рекомендації щодо використання сенсорних мереж і цифрових двійників для оптимізації експлуатаційних характеристик у промисловості. Окреслено перспективи розвитку інноваційних алгоритмів і методів прогнозування стану конструкцій.

Ключові слова: кінематичний аналіз, інженерна оптимізація, структурна динаміка, вібраційна стійкість.

Постановка проблеми

Моделювання динамічних систем у проєктуванні механічних конструкцій для промисловості є ключовим напрямом сучасної інженерної науки та практики, що пов'язаний з необхідністю вирішення складних завдань, зумовлених зростаючими вимогами до ефективності, надійності та функціональності промислового обладнання. З розвитком інноваційних технологій у виробництві та підвищенням складності конструкцій виникає потреба в детальному аналізі кінематичних характеристик, структурної динаміки, а також в оцінці вібраційної стійкості механічних систем. Такі дослідження дозволяють знизити ризик аварій, продовжити строк експлуатації обладнання, мінімізувати енергетичні витрати та підвищити продуктивність.

Наукові завдання в цій галузі включають розробку нових моделей для аналізу динамічної поведінки механічних систем, інтеграцію параметричних і адаптивних підходів до проєктування, а також створення інноваційних методів для оптимізації конструкцій з урахуванням змінних зовнішніх умов. У практичному вимірі це знаходить відображення у вдосконаленні виробничих процесів, розробці механізмів з поліпшеними характеристиками і створенні умов для їхньої гнучкої адаптації до специфічних потреб промисловості.

Важливість цього напрямку обумовлена потребою промислових підприємств у впровадженні високотехнологічних рішень, що сприяють збільшенню конкурентоспроможності, скороченню витрат на технічне обслуговування і підвищенню екологічної стійкості виробництва. Таким чином, зв'язок між фундаментальними науковими дослідженнями та прикладними завданнями забезпечує основу для створення прогресивних механічних конструкцій, які відповідають сучасним викликам інженерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній науковій літературі значна увага приділяється моделюванню динамічних систем у контексті проєктування механічних конструкцій, що охоплює різноманітні аспекти цієї тематики. Л.І. Лаврінченко та Л.В. Афанасьєва акцентують увагу на дослідженні вогнестійкості будівельних конструкцій, розглядаючи методи забезпечення їхньої стійкості до високих температур, що є важливим для моделювання систем, здатних працювати в екстремальних умовах [1].

Дослідження В.М. Лазебного разом із колегами спрямовані на принципи тривимірного моделювання механічних деталей із використанням програмного забезпечення AutoCAD і SolidWorks. У їхніх працях розглядаються інструменти, що дозволяють створювати високоточні моделі, оптимізуючи геометричні параметри конструкцій [2; 3].

Проблематику автоматизації проєктування та її ефективність у навчальному процесі аналізують М.О. Морнєва та А.С. Торопов. Вони наголошують на необхідності врахування освітніх аспектів при використанні сучасних графічних систем для підготовки інженерів [4].

Методи моделювання, ідентифікації та симуляції динамічних систем ґрунтовно розглядаються в роботах P.J. Van den Bosch та A.C. Van der Klauw. Автори детально описують підходи до ідентифікації параметрів складних конструкцій, що сприяє створенню точних моделей [5].

Сучасні математичні методи оптимізації у контексті ідентифікації нелінійних систем аналізує О. Nelles. Його дослідження висвітлює питання прогнозування поведінки систем за змінних умов [6].

Інтеграцію цифрових двійників у процес моніторингу та діагностики пошкоджень структур пропонують T.G. Ritto та F.A. Rochinha. Їхні підходи базуються на комбінації фізичних моделей із технологіями машинного навчання [7].

Сучасні аспекти гібридного моделювання в індустрії 4.0 досліджують J. Sansana та співавтори, наголошуючи на важливості поєднання фізичних і

цифрових моделей для забезпечення адаптивності систем [8].

Підходи до фільтрації сигналів у системах з обмеженнями аналізує J.H. Park, зосереджуючись на вдосконаленні методів управління динамічними системами для покращення їхньої точності та стабільності [9].

Застосування машинного навчання у моделюванні рідин детально описують S.L. Brunton, B.R. Noack та P. Koumoutsakos. Це дослідження є важливим для конструкцій, що піддаються впливу аеродинамічних або гідродинамічних навантажень [10].

Дослідження цифрових двійників у проектуванні смарт-виробничих систем представлені J. Leng та його співавторами. Автори розкривають потенціал інтеграції цифрових технологій для підвищення ефективності промислових процесів [11].

Техніки діагностики переривчастих несправностей у динамічних системах аналізують D. Zhou та інші дослідники. Їхня робота демонструє, як використання сучасних алгоритмів підвищує надійність конструкцій [12].

Н. Нео разом зі співавторами пропонують проєктні рішення для механічних конструкцій, які враховують одночасно екологічні, економічні та технологічні аспекти. Їхні багатофункціональні підходи орієнтовані на створення стійких систем [13].

Методи оптимізації процесів управління виробництвом в умовах індустрії 4.0 аналізують A. Dolgui та його співавтори. Вони акцентують увагу на інтеграції адаптивних і параметричних підходів у виробничі системи [14].

Отже, аналіз наукових публікацій свідчить про широкий спектр досліджень, присвячених моделюванню динамічних систем. Водночас залишаються невирішеними питання інтеграції кінематичного аналізу, структурної динаміки та параметричної оптимізації, що обмежує ефективність цих рішень у складних умовах експлуатації.

Існує потреба у створенні моделей, які поєднують параметричні й адаптивні підходи, забезпечуючи оптимізацію конструкцій із врахуванням мінливих умов. Проблеми впровадження сучасних інженерних інструментів, зокрема через їх високу вартість і технічні обмеження, гальмують їхнє застосування в традиційних виробничих процесах.

Запропоноване дослідження спрямоване на розробку нової інтеграційної моделі та рекомендацій для практичної оптимізації механічних конструкцій,

що дозволить подолати ці обмеження й забезпечити надійність та ефективність конструкцій у сучасній промисловості.

Мета статті

Аналіз науково обґрунтованих підходів до моделювання динамічних систем у проєктуванні механічних конструкцій для промисловості, з урахуванням сучасних вимог до надійності, вібраційної стійкості та адаптивності до змінних умов експлуатації.

Завдання статті:

1. Описати сучасні підходи до моделювання динамічних систем у контексті їх використання для проєктування механічних конструкцій.

2. Дослідити вплив адаптивних рішень і сучасних інженерних інструментів на показники ефективності, вібраційної стійкості та довговічності механічних конструкцій.

Виклад основного матеріалу

Моделювання динамічних систем у проєктуванні механічних конструкцій є важливим аспектом сучасної інженерної науки, спрямованим на підвищення точності розрахунків, надійності та функціональності промислового обладнання. Основними напрямками досліджень у цій галузі є кінематичний аналіз, структурна динаміка та параметрична оптимізація. Кінематичний аналіз дозволяє досліджувати рух окремих елементів механічної системи, враховуючи їхню геометрію, взаємодію та фізичні характеристики. Це забезпечує можливість виявлення оптимальних параметрів конструкції для зменшення навантажень і збільшення ефективності роботи. Структурна динаміка досліджує поведінку конструкцій під впливом динамічних навантажень. У цьому аспекті особливу увагу приділяють резонансним явищам, вібраціям та зовнішнім збуренням, що впливають на стабільність і довговічність механічних конструкцій. Параметрична оптимізація дозволяє вдосконалювати конструкції шляхом вибору оптимальних геометричних, матеріальних і функціональних параметрів, які відповідають заданим умовам експлуатації. Це забезпечує підвищення ефективності роботи обладнання та зменшення витрат на його обслуговування (табл. 1)

Таблиця 1

Методи моделювання динамічних систем у проєктуванні механічних конструкцій та їх практичне застосування

Метод	Основний принцип роботи	Практичні аспекти застосування у промисловості
Кінематичний аналіз	Вивчення траєкторій руху елементів	Забезпечує точний розрахунок взаємодії елементів механізмів для їх оптимізації
Структурна динаміка	Аналіз динамічних характеристик	Допомагає уникати резонансних явищ та підвищує довговічність конструкцій
Параметрична оптимізація	Вибір оптимальних параметрів системи	Знижує вагу, витрати матеріалів і покращує функціональність механізмів

Джерело: сформовано автором на підставі [4, 6, 9]

На практиці ці методи працюють як взаємопов'язані етапи у процесі проєктування механічних конструкцій. Наприклад, кінематичний аналіз дозволяє визначити оптимальну траєкторію руху елементів механізму, що потім враховується при структурному аналізі для оцінки стійкості до вібрацій і зовнішніх впливів. Результати цього аналізу стають основою для параметричної оптимізації, яка дозволяє вдосконалити конструкцію, мінімізуючи вагу або витрати на матеріали, водночас забезпечуючи відповідність функціональним вимогам. У сучасних умовах застосування програмних комплексів, таких як ANSYS або MATLAB [6], дозволяє інженерам автоматизувати ці процеси, значно скорочуючи час на розробку і забезпечуючи високу точність результатів.

Використання адаптивних рішень у проєктуванні механічних конструкцій стало важливим напрямом у сучасній інженерії, оскільки дозволяє створювати системи, які можуть самостійно реагувати на змінні умови експлуатації. Адаптивність конструкцій досягається завдяки впровадженню матеріалів з інтегрованими сенсорними властивостями, використанню автоматичних систем управління параметрами та застосуванню інтелектуальних алгоритмів аналізу даних у реальному часі. Це сприяє підвищенню ефективності механізмів, забезпеченню їхньої вібраційної стійкості та подовженню строку експлуатації. У структурі адаптивних рішень особливе місце займають методи активного та пасивного контролю вібрацій, які дозволяють мінімізувати вплив динамічних навантажень на конструкцію (табл.2).

Таблиця 2

Вплив адаптивних рішень на ефективність, вібраційну стійкість та довговічність механічних конструкцій

Аспект впливу	Адаптивні рішення	Результати впровадження у механічних конструкціях
Ефективність	Інтелектуальні системи управління	Зниження енергоспоживання, підвищення точності роботи
Вібраційна стійкість	Активні демпфери, сенсорні матеріали	Мінімізація амплітуди коливань, зниження ризику резонансних явищ
Довговічність	Саморегулюючі елементи, матеріали з пам'яттю форми	Зменшення зносу компонентів, подовження експлуатаційного строку

Джерело: сформовано автором на підставі [9, 13, 15]

На практиці адаптивні рішення інтегруються у конструкції завдяки використанню сучасних технологій, таких як сенсори для моніторингу стану систем у реальному часі, адаптивні алгоритми управління і програмні модулі для аналізу динамічних характеристик. Наприклад, у сучасних авіаційних двигунах застосовуються активні демпфери, які автоматично налаштовують параметри системи для уникнення резонансних коливань під час роботи на різних частотах. У машинобудуванні використання матеріалів з пам'яттю форми забезпечує автоматичну корекцію геометрії конструкцій, що дозволяє зменшити знос і покращити стабільність у роботі. Такі підходи значно підвищують ефективність обладнання, знижують витрати на технічне обслуговування і забезпечують відповідність конструкцій сучасним вимогам промисловості.

Інтеграція параметричних і адаптивних підходів у проєктуванні механічних конструкцій є сучасним напрямом, що дозволяє створювати більш ефективні,

стійкі та довговічні рішення для промисловості [10]. Ця модель відрізняється від традиційних підходів тим, що вона поєднує оптимізацію ключових параметрів конструкції на стадії проєктування з можливістю автоматичного налаштування конструкцій у реальному часі під змінні експлуатаційні умови. Параметричний підхід забезпечує оптимізацію геометричних і фізичних параметрів конструкції, тоді як адаптивний додає можливість динамічної реакції системи на зміни, такі як температурні коливання, динамічні навантаження або зношування компонентів. Це не лише підвищує загальну ефективність конструкцій, але й знижує витрати на їх обслуговування, забезпечуючи гнучкість і стійкість до зовнішніх чинників. Необхідність такого підходу зумовлена складністю сучасних промислових процесів, що потребують високої адаптивності й швидкого реагування на непередбачувані зміни (табл.3).

Таблиця 3

Компоненти моделі інтеграції параметричних і адаптивних підходів у проєктуванні механічних конструкцій

Компонент моделі	Параметричний підхід	Адаптивний підхід	Результати інтеграції
Оптимізація	Вибір оптимальних геометричних параметрів	Динамічне налаштування у реальному часі	Зменшення витрат на матеріали, покращення функціональності
Моніторинг стану	Розрахунки на основі початкових умов	Використання сенсорних систем	Реагування на зношування і зовнішні зміни
Реакція на зміни	Періодичний аналіз параметрів	Автоматична корекція у відповідь на умови	Збільшення довговічності та стійкості

Джерело: власна розробка автора

На практиці зазначена модель функціонує шляхом поєднання програмних розрахункових комплексів, зокрема ANSYS і SolidWorks, з інтеграцією сенсорних систем і алгоритмів машинного навчання. Наприклад, у сфері проєктування будівельних кранів параметричний аналіз сприяє оптимізації геометрії стріли для зменшення ваги конструкції, тоді як адаптивні алгоритми дозволяють коригувати її нахил або довжину залежно від навантаження та вітрових умов. У транспортній галузі така технологія забезпечує можливість автоматичного регулювання підвіски шасі, що залежить від якості дорожнього покриття або ваги вантажу. Інтеграція цих підходів дає змогу знизити витрати на обслуговування, зменшити кількість аварій і підвищити надійність конструкцій, водночас відповідаючи сучасним вимогам промислового сектору.

Разом із тим, впровадження сучасних інженерних інструментів у процеси моделювання та проєктування динамічних систем супроводжується низкою проблем, що суттєво впливають на їх ефективність у промисловості. Одним із ключових викликів є технічні обмеження програмного забезпечення. Стандартні інструменти часто не враховують специфіку окремих галузей, що створює потребу в розробці кастомізованих рішень. Наприклад, у випадках із нелінійними динамічними характеристиками систем існуючі засоби можуть бути недостатньо точними. Іншою важливою проблемою є сумісність нових інструментів із наявною інженерною інфраструктурою. Інтеграція таких технологій нерідко вимагає модернізації обладнання, що суттєво підвищує загальні витрати підприємств.

Фінансові витрати на впровадження сучасних технологій також залишаються суттєвим стримуючим фактором. Вартість програмного забезпечення, сенсорів і супутніх технологій може бути невідомою для багатьох компаній, особливо за умов обмежених бюджетів. Додаткові ресурси потрібні й для навчання персоналу, що значно ускладнює впровадження інновацій навіть у випадках, коли вони могли б забезпечити значні конкурентні переваги.

Особливого значення набувають організаційні виклики, пов'язані з інтеграцією нових інженерних

інструментів у традиційні процеси проєктування. Нерідко різні підрозділи підприємств використовують неузгоджені підходи до виконання завдань, що ускладнює впровадження інновацій. Відсутність чіткої стратегії впровадження може призводити до дублювання зусиль або виникнення конфліктів між командами, що займаються різними аспектами проєктування.

Додатковим обмеженням є залежність від імпортованих технологій і складнощі з доступом до передових інструментів через геополітичні або економічні фактори. У таких умовах підприємства нерідко змушені використовувати застарілі рішення, що не відповідають сучасним вимогам. Цю ситуацію поглиблює недостатній рівень науково-технічної підтримки з боку держави, що обмежує можливості для локальної розробки і адаптації інструментів до специфічних умов ринку.

Таким чином, вирішення зазначених проблем є ключовим для підвищення ефективності використання сучасних інженерних технологій у промисловості, а також для забезпечення їхньої конкурентоспроможності в глобальному середовищі.

Оптимізація механічних конструкцій для підвищення їхньої ефективності та стійкості є одним із ключових завдань сучасної інженерії, що покликана задовольнити зростаючі вимоги до промислового обладнання. У цьому контексті важливим стає впровадження інноваційних матеріалів, які забезпечують оптимальне поєднання легкості, міцності та стійкості до зношування. Використання композитів на основі вуглецевих волокон, наприклад, дозволяє значно знизити вагу конструкцій, одночасно підвищуючи їхню міцність і довговічність. До переваг таких матеріалів належать також висока стійкість до корозії та втоми, що гарантує стабільну експлуатацію навіть у складних умовах.

Інтеграція сучасних цифрових технологій у процес проєктування є ще одним важливим напрямом. Методи числового моделювання відкривають можливість створення точних цифрових двійників механічних конструкцій, що дозволяють прогнозувати їхню поведінку за різних сценаріїв навантаження. Це значно скорочує час на розробку, підвищує точність

розрахунків і зменшує кількість необхідних фізичних прототипів. Додатково використання алгоритмів оптимізації, таких як генетичні алгоритми або методи машинного навчання, забезпечує автоматизований вибір оптимальних параметрів конструкцій відповідно до заданих критеріїв.

Адаптивність механічних конструкцій до змінних умов експлуатації відіграє ключову роль у підвищенні їхньої ефективності. Використання активних елементів, як-от демпфери з регульованими параметрами або матеріали з пам'яттю форми, дозволяє автоматично налаштовувати конструкцію у відповідь на змінні зовнішні впливи. Такі рішення забезпечують підвищену стійкість до вібрацій і зменшують ризик пошкоджень, що особливо важливо в галузях авіабудування, транспортної інфраструктури та енергетики.

Ще одним важливим фактором оптимізації є енергетична ефективність. Використання енергозберігаючих технологій, зокрема систем регенерації енергії та наноматеріалів для зменшення тертя, сприяє зниженню експлуатаційних витрат і мінімізації впливу на довкілля. Це набуває особливого значення в контексті глобальних тенденцій до сталого розвитку промисловості.

З огляду на вищезазначене, оптимізація механічних конструкцій базується на синергії інноваційних матеріалів, передових технологій моделювання, адаптивних рішень та підвищення енергоефективності. Застосування цих підходів дозволяє не лише відповідати сучасним вимогам, але й забезпечити довговічність, надійність і економічну ефективність конструкцій у довгостроковій перспективі.

Література

1. Лаврінченко Л. І., Афанасьєва Л. В. Деякі аспекти проектування будівельних конструкцій відповідно до вимог вогнестійкості. *Збірник праць XIX Міжнародної наукової конференції "Сучасні досягнення в науці та освіті"*, 29 вересня – 6 жовтня 2024 р., м. Нетанія (Ізраїль). Хмельницький: ХНУ, 2024. (С. 125–130). URL: <https://elar.khmn.edu.ua/items/9e215569-1ef1-460b-933f-6b928b8a0a77> (дата звернення: 02.12.2024).
2. Lazebnyi V., Dosenko S., Bilevska O. Principles of 3D modeling of mechanical parts for use of the 3D printer. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2020. Issue 41. P. 51–58. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-41-09> (date of access: 02.12.2024).
3. Лазебний В. М. Моделювання механічних деталей за допомогою AutoCAD і SolidWorks для друку на 3D-принтерах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*.

Висновки

У процесі дослідження встановлено, що моделювання динамічних систем у проектуванні механічних конструкцій має критичне значення для підвищення надійності, ефективності та довговічності промислового обладнання. Основні напрями вдосконалення включають кінематичний аналіз, структурну динаміку, параметричну оптимізацію та адаптивні рішення, які сприяють інтеграції сучасних технологій у виробничі процеси. Зокрема, результати дослідження показали, що впровадження інтелектуальних систем управління та інноваційних матеріалів дозволяє мінімізувати вібрації, підвищити стійкість до змінних умов експлуатації та знизити витрати на технічне обслуговування.

Водночас виявлено низку ключових проблем. Серед них слід зазначити технічні обмеження програмного забезпечення, високу вартість впровадження сучасних технологій, необхідність модернізації інфраструктури та недостатній рівень координації між підрозділами підприємств. Окрему увагу слід приділити залежності від імпорту технологій та недостатньому рівню науково-технічної підтримки з боку держави, що є важливими перешкодами для масштабного впровадження інновацій.

Перспективи подальших досліджень охоплюють розробку нових алгоритмів оптимізації, спрямованих на зниження енергоспоживання та підвищення точності моделей, а також створення гнучких адаптивних систем, здатних автоматично адаптуватися до змінних умов експлуатації у реальному часі. Окремо підкреслюється перспективність розвитку сенсорних мереж і алгоритмів машинного навчання для моніторингу стану конструкцій та прогнозування їхнього зносу, що сприятиме подальшому підвищенню ефективності експлуатації механізмів.

2021. Том 32 (71), № 3. С. 104–110. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3_2021.pdf#page=113 (дата звернення: 02.12.2024).

4. Морнева М. О., Торопов А. С. Порівняльна оцінка систем графічного моделювання і принципів автоматизації проектування під час використання студентами інженерних спеціальностей. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т.29(68), № 6, Ч. 1. С. 54–57. URL: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/eng/journals/2018/6_2018/part_1/11.pdf (дата звернення: 02.12.2024).

5. Van den Bosch P. J., Van der Klauw A. C. *Modeling, Identification and Simulation of Dynamical Systems*. CRC Press, 2020. 354 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780138746872> (date of access: 02.12.2024).

6. Nelles O. *Nonlinear Dynamic System Identification*. In: *Nonlinear System Identification*. Springer, Cham, 2020. P. 439–479. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-47439-3_19 (date of access: 02.12.2024).

7. Ritto T. G., Rochinha F. A. Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 155. Article 107614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107614> (date of access: 02.12.2024).
8. Sansana J., et al. Recent trends on hybrid modeling for Industry 4.0. *Computers & Chemical Engineering*. 2021. Vol. 151. Article 107365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107365> (date of access: 02.12.2024).
9. Park J. H., et al. *Recent Advances in Control and Filtering of Dynamic Systems with Constrained Signals*. Berlin: Springer International Publishing, 2019. 302 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96202-3> (date of access: 02.12.2024).
10. Brunton S. L., Noack B. R., Koumoutsakos P. Machine Learning for Fluid Mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 52, Issue 1. P. 477–508. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060214> (date of access: 02.12.2024).
11. Leng J., et al. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 60. P. 119–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011> (date of access: 02.12.2024).
12. Zhou D., Zhao Y., Wang Z., He X., Gao M. Review on Diagnosis Techniques for Intermittent Faults in Dynamic Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, Issue 3. P. 2337–2347. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2907500> (date of access: 02.12.2024).
13. Hao H., et al. Towards Next Generation Design of Sustainable, Durable, Multi-Hazard Resistant, Resilient, and Smart Civil Engineering Structures. *Engineering Structures*. 2023. Vol. 277. Article 115477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115477> (date of access: 02.12.2024).
14. Dolgui A., et al. Scheduling in Production, Supply Chain and Industry 4.0 Systems by Optimal Control: Fundamentals, State-of-the-Art and Applications. *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57, Issue 2. P. 411–432. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442948> (date of access: 02.12.2024).
15. Ostertag A., et al. Reliable design of adaptive load-bearing structures with focus on sustainability. In: *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*. Venice (Italy), 2020. (P. 978–981). URL: <https://www.rpsonline.com.sg/proceedings/esrel2020/pdf/3806.pdf> (date of access: 02.12.2024).

References

1. Lavrinenko, L. I., & Afanasieva, L. V. (2024). Deiaki aspekty proiektuvannia budivelnnykh konstrukttsii vidpovidno do vymoh vohnevostyikosti [Some aspects of designing building structures according to fire resistance requirements]. *Zbirnyk prats XIX Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii "Suchasni dosiahennia v nautsi ta osviti" – Proceedings of the XIX International Scientific Conference "Modern Achievements in Science and Education"* (pp. 125–130). Khmelnytskyi: KhNU. Retrieved from <https://elar.khmn.edu.ua/items/9e215569-1ef1-460b-933f-6b928b8a0a77> [in Ukrainian].
2. Lazebnyi, V., Dosenko, S., & Bilevska, O. (2020). Principles of 3D modeling of mechanical parts for use of the 3D printer. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, 41, 51–58. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-41-09>.
3. Lazebnyi, V. M. (2021). Modeliuvannia mekhanichnykh detalei za dopomohoiu AutoCAD i SolidWorks dlia drukhu na 3D-prynterakh [Modeling of mechanical parts using AutoCAD and SolidWorks for 3D printing]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 32(71), 104–110. Retrieved from https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3_2021/3_2021.pdf#page=113 [in Ukrainian].
4. Morneva, M. O., & Toropov, A. S. (2018). Porivnialna otsinka system hrafichnogo modeliuvannia i pryntsyviv avtomatyzatsii proiektuvannia pid chas vykorystannia studentamy inzhenernykh spetsialnostei [Comparative assessment of graphic modeling systems and automation principles in design used by engineering students]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 29(68), 54–57. Retrieved from https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/eng/journals/2018/6_2018/part_1/11.pdf [in Ukrainian].
5. Van den Bosch, P. J., & Van der Klauw, A. C. (2020). *Modeling, identification and simulation of dynamical systems*. Boca Raton: CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780138746872>.
6. Nelles, O. (2020). *Nonlinear Dynamic System Identification*. In *Nonlinear System Identification* Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-47439-3_19.
7. Ritto, T. G., & Rochinha, F. A. (2021). Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 155, Article 107614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.107614>.
8. Sansana, J., et al. (2021). Recent trends on hybrid modeling for Industry 4.0. *Computers & Chemical Engineering*, 151, Article 107365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107365>.

9. Park, J. H., et al. (2019). *Recent advances in control and filtering of dynamic systems with constrained signals*. Berlin: Springer International Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96202-3>.
10. Brunton, S. L., Noack, B. R., & Koumoutsakos, P. (2020). Machine learning for fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 52(1), 477–508. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060214>.
11. Leng, J., et al. (2021). Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 119–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>.
12. Zhou, D., Zhao, Y., Wang, Z., He, X., & Gao, M. (2020). Review on diagnosis techniques for intermittent faults in dynamic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(3), 2337–2347. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2907500>.
13. Hao, H., et al. (2023). Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard resistant, resilient, and smart civil engineering structures. *Engineering Structures*, 277, Article 115477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115477>.
14. Dolgui, A., et al. (2019). Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: Fundamentals, state-of-the-art and applications. *International Journal of Production Research*, 57(2), 411–432. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1442948>.
15. Ostertag, A., et al. (2020). Reliable design of adaptive load-bearing structures with focus on sustainability. In *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference* (pp. 978–981). Venice: Research Publishing. Retrieved from <https://www.rpsonline.com.sg/proceedings/esrel2020/pdf/3806.pdf>.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., завідувач кафедрою комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну, Кузьмінець Микола Петрович, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна

Автор: МАКСИМ'ЮК Юрій Всеволодович
доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
E-mail: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

Автор: АВДІЙЧУК Олександр Володимирович
аспірант кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
E-mail: avdiichuk_ov-2022@knuba.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1035-2084>

Автор: ЛУК'ЯНЧУК Дмитро Володимирович
аспірант кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
E-mail: lukianchuk_dv-2022@knuba.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1182-2472>

MODELING OF DYNAMIC SYSTEMS IN THE DESIGN OF MECHANICAL STRUCTURES FOR INDUSTRY

Y. Maksymiuk, O. Avdiichuk, D. Lukianchuk
Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

Modeling dynamic systems in the design of mechanical structures is a crucial area of modern engineering as it ensures increased efficiency, reliability, and resilience of equipment under changing operational conditions. The relevance of this study is driven by the necessity to develop high-tech solutions that address contemporary industrial challenges, particularly through the integration of adaptive and parametric approaches to design. The growing demands for energy efficiency, durability, and cost reduction in maintenance highlight the importance of utilizing innovative materials and modern engineering tools.

The aim of this study is to develop approaches for modeling dynamic systems using integrated parametric and adaptive methods to enhance the efficiency and resilience of mechanical structures under variable operational conditions. To achieve this aim, the study employed analytical reviews of contemporary approaches to dynamic system design, modeling of their behavior under changing loads, and comparative analysis of methods for integrating adaptive solutions into mechanical structures.

The study analyzed modern methods for modeling dynamic systems and assessed their practical efficiency in the industry. A model was developed to integrate parametric and adaptive approaches, enabling the optimization of structures while considering variable technological conditions. Key challenges were identified, including the high cost of implementation, technical limitations of software, and insufficient integration of innovations into traditional manufacturing processes.

The conclusions emphasize that the use of adaptive solutions and advanced materials significantly reduces vibrations, increases structural durability, and decreases maintenance costs. Recommendations include implementing sensor networks and digital twins for real-time equipment monitoring, as well as improving optimization models.

The prospects for further research involve developing new algorithms to enhance energy efficiency, integrating adaptive systems into industrial equipment, and creating innovative methods for predicting the technical condition of structures. This will ensure high industrial competitiveness in a dynamically changing market environment.

Keywords: *kinematic analysis, engineering optimisation, structural dynamics, vibration stability.*