

УДК 621.923:620.1:004.942

DOI <https://doi.org/10.35220/2523-420X/2025.4.20>**О.А. Варакута,**

кандидат медичних наук, доцент,  
доцент кафедри стоматології післядипломної освіти,  
Запорізький державний  
медико-фармацевтичний університет,  
бульв. Марії Примаченко, 26, м. Запоріжжя, Україна,  
індекс 69035, [alekseev240576@gmail.com](mailto:alekseev240576@gmail.com)  
ORCID ID: 0009-0004-6885-3904

**К.С. Ганчев,**

кандидат медичних наук, доцент,  
доцент кафедри пропедевтичної  
та хірургічної стоматології,  
Запорізький державний  
медико-фармацевтичний університет,  
бульв. Марії Примаченко, 26, м. Запоріжжя, Україна,  
індекс 69035, [kirillganchev@gmail.com](mailto:kirillganchev@gmail.com)  
ORCID ID: 0000-0002-5878-7980

**С.О. Сапальов,**

кандидат медичних наук,  
доцент кафедри пропедевтичної  
та хірургічної стоматології,  
Запорізький державний  
медико-фармацевтичний університет,  
бульв. Марії Примаченко, 26, м. Запоріжжя, Україна,  
індекс 69035, [alekseev240576@gmail.com](mailto:alekseev240576@gmail.com)  
ORCID ID: 0000-0002-9536-2367

## МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ В ЗУБОТЕХНІЧНІЙ ПРАКТИЦІ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

**Актуальність дослідження** зумовлена ускладненням технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці в умовах цифровізації зуботехнічної практики, зростанням вимог до точності, відтворюваності та сталої якості ортопедичних конструкцій, а також обмеженістю емпіричних підходів до вибору й коригування технологічних режимів. У таких умовах особливо важливим стає застосування системного аналізу як науково обґрунтованого методологічного підходу до моделювання процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці. Це дозволяє забезпечити формалізацію багатфакторних взаємозв'язків та підвищити керованість виробничих операцій.

**Мета дослідження** полягає у формуванні та науковому обґрунтуванні системно орієнтованого підходу до моделювання технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці. Його реалізація спрямована на підвищення ефективності управління, сталості технологічних режимів і якості кінцевих результатів у зуботехнічній практиці.

**Матеріали та методи дослідження** ґрунтуються на

застосуванні системного аналізу, структурно-функціонального підходу та методів формалізованого моделювання технологічних процесів. Під час дослідження проаналізовано сучасні технологічні способи моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці, узагальнено властивості основних структурних елементів виробничої системи та обґрунтовано принципи побудови системних моделей без використання емпіричних коректив. Використано аналітичні методи узагальнення, логічного моделювання та порівняльної інтерпретації отриманих результатів.

**Наукова новизна** полягає в обґрунтуванні методологічних принципів системного моделювання процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці як цілісної технологічної системи, в якій виокремлено інформаційний, матеріальний та управлінський рівні. Доведено доцільність відокремлення інформаційного рівня технологічної підготовки від фізичної реалізації, що створює умови для прогнозування результатів і оптимізації режимів обробки. Виявлено основні науково-практичні обмеження побудови системних моделей, пов'язаних із багатофакторністю процесів, варіативністю матеріалів і фрагментарністю цифрових рішень.

**Висновки.** У ході дослідження встановлено, що системне моделювання забезпечує підвищення керованості технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та зменшує залежність виробничих рішень від емпіричних підходів. Доведено, що використання системних моделей дозволяє ідентифікувати критичні параметри процесу, стабілізувати якість зуботехнічних виробів і підвищити відтворюваність результатів. Виявлено, що подальший розвиток моделей має бути спрямований на підвищення їх адаптивності, інтеграцію з даними цифрового контролю й розширення прогностичних можливостей. Це формує перспективний напрям наукових досліджень у сфері цифрової зуботехнічної практики.

**Ключові слова:** цифрове виробництво, технологічні режими, керованість процесів, якість ортопедичних конструкцій, структурно-функціональний підхід, адаптивність виробничої системи, прогнозування параметрів.

**О.А. Varakuta,**

PhD in Medicine, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Dentistry  
of Postgraduate Education,  
Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University,  
26 Marii Prymachenko Boulevard, Zaporizhzhia, Ukraine,  
postal code 69035, [alekseev240576@gmail.com](mailto:alekseev240576@gmail.com)  
ORCID ID: 0009-0004-6885-3904

**K.S. Hanchev,**

PhD in Medicine, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Propaedeutic  
Dentistry and Oral Surgery,  
Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University,  
26 Marii Prymachenko Boulevard, Zaporizhzhia, Ukraine,  
postal code 69035, [kirillganchev@gmail.com](mailto:kirillganchev@gmail.com)  
ORCID ID: 0000-0002-5878-7980

**S.O. Sapalov,**

PhD in Medicine,

Associate Professor of the Department of Propaedeutic  
and Surgical Dentistry,

Zaporizhzhia State Medical and Pharmaceutical University,  
26 Marii Prymachenko Boulevard, Zaporizhzhia, Ukraine,  
postal code 69035, alekseev240576@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0002-9536-2367

## MODELING OF STRUCTURES IN DENTAL PRACTICE BASED ON SYSTEM ANALYSIS

*The relevance of this study is determined by the increasing complexity of technological processes for modeling structures in dental laboratory practice under conditions of digitalization, the growing requirements for accuracy, reproducibility, and consistent quality of prosthetic constructions, as well as the limitations of empirical approaches to the selection and adjustment of technological regimes. Under these conditions, the application of systems analysis becomes particularly important as a scientifically grounded methodological approach to modeling construction modeling processes in dental laboratory practice. This approach makes it possible to formalize multifactorial relationships and to enhance the controllability of production operations.*

*The aim of the study is to develop and scientifically substantiate a system-oriented approach to modeling technological processes of construction modeling in dental laboratory practice. Its implementation is focused on improving management efficiency, the stability of technological regimes, and the quality of final outcomes in dental laboratory practice.*

*Materials and methods.* The study is based on the application of systems analysis, a structural and functional approach, and methods of formalized modeling of technological processes. Modern technological methods for modeling structures in dental laboratory practice were analyzed, the properties of the main structural elements of the production system were generalized, and the principles for constructing system models without the use of empirical adjustments were substantiated. Analytical methods of generalization, logical modeling, and comparative interpretation of the obtained results were applied.

*Scientific novelty.* The scientific novelty lies in the substantiation of methodological principles for system-based modeling of construction modeling processes in dental laboratory practice as an integral technological system in which informational, material, and managerial levels are distinguished. The expediency of separating the informational level of technological preparation from physical implementation has been demonstrated, which creates conditions for outcome prediction and optimization of processing regimes. The main scientific and practical limitations in constructing system models have been identified, including the multifactorial nature of processes, variability of materials, and fragmentation of digital solutions.

*Conclusions.* The study established that system-based modeling enhances the controllability of technological processes for construction modeling in dental laboratory practice and reduces the dependence of production decisions on empirical approaches. It was demonstrated

*that the use of system models makes it possible to identify critical process parameters, stabilize the quality of dental laboratory products, and improve the reproducibility of results. Further development of the models should focus on increasing their adaptability, integrating digital monitoring data, and expanding predictive capabilities. This defines a promising direction for scientific research in the field of digital dental laboratory practice.*

**Key words:** digital manufacturing, technological regimes, process controllability, quality of prosthetic constructions, structural and functional approach, adaptability of the production system, parameter prediction.

**Постановка проблеми.** Сучасна зуботехнічна практика характеризується високим рівнем технологічної складності зубообробних процесів. Це зумовлено широким використанням CAD/CAM-систем (Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing), цифрового проектування ортопедичних конструкцій, різноманітням оброблюваних матеріалів, а також суворими вимогами до точності, відтворюваності й біосумісності готових виробів. За цих умов традиційні емпіричні підходи до вибору режимів механічної обробки, інструментів і послідовності технологічних операцій виявляються недостатніми. Вони не забезпечують стабільної якості результатів, зниження виробничих втрат і раціонального використання матеріальних та часових ресурсів. Зростає потреба у формалізованих моделях, здатних коректно відображати багатофакторний механізм технології процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та їхню динаміку в межах єдиного виробничого циклу. Особливої актуальності набуває застосування системного аналізу як методологічної основи моделювання технологічних процесів у зуботехнічній практиці. Це дає змогу розглядати його як складну ієрархічну систему із взаємопов'язаними підсистемами матеріалів, обладнання, програмного забезпечення, технологічних режимів і людського чинника. Відсутність узагальнених системних моделей ускладнює прогнозування результатів обробки, оцінювання впливу змін окремих параметрів на кінцеву якість ортопедичних конструкцій, а також прийняття обґрунтованих технологічних рішень у реальних умовах зуботехнічних лабораторій. Проблема моделювання технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці на основі системного аналізу безпосередньо пов'язана з розв'язанням важливих наукових і практичних завдань. Зокрема, формуванням теоретичних засад інтегрованого опису процесів механічної обробки стоматологічних матеріалів, підвищенням точності й від-

творюваності цифрово керованих виробничих операцій, оптимізацією режимів обробки, а також зниженням ризиків технологічних недоліків. На практичному рівні вирішення зазначеної проблеми створює передумови для вдосконалення організації роботи зуботехнічних лабораторій, скорочення термінів виготовлення ортопедичних конструкцій, підвищення їх клінічної якості та забезпечення відповідності сучасним стандартам цифрової стоматології. Це підкреслює значущість системного підходу як інструменту наукового обґрунтування й підтримки технологічних рішень у сфері зуботехнічної практики.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Огляд сучасних наукових праць свідчить про послідовне зміщення акцентів від локального опису цифрових інструментів до комплексного уявлення зуботехнічного виробництва як багаторівневої технологічної системи з численними зворотними зв'язками між проектуванням, виготовленням і експлуатацією виробів. Значна частина досліджень фокусується на цифровому та віртуальному відтворенні технологічних процесів. М. Панг та співавтори (M. Pang et al.) обґрунтували застосування віртуальної симуляційної платформи, яка дозволяє моделювати стоматологічні технологічні процедури в керованому цифровому середовищі, що слугує основою системного аналізу параметрів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та їхнього впливу на результат [1].

Подібну логіку розвитку ідеї цифрового моделювання продовжують Дж. Д. М. д. Матос та співавтори (J. D. M. d. Matos et al.), які узагальнюють інструменти експериментального та комп'ютерного інженерного аналізу. Вони доводять доцільність використання біоінженерних цифрових моделей для прогнозування поведінки матеріалів і результатів обробки ще на етапі проектування [2]. Концептуальне підґрунтя такого підходу формують Л. А. Добжанський та Л. В. Добжанський (L. A. Dobrzański, L. V. Dobrzański), які в межах концепції Dentistry 4.0 розглядають технологічні процеси моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці як складові кіберфізичної системи, інтегрованої з CAD/CAM та комп'ютерним інженерним аналізом (computer-aided engineering, CAE) [3].

Низка праць пов'язана з кількісним аналізом процесів механічної моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та зношування матеріалів і інструментів. Ф. Іліє та співавтори (F. Ilie et al.) пропонують статистично-математичну модель зношування стоматологічних фрез, у якій процес

різання інтерпретується як багатофакторна стохастична система, чутлива до режимів обробки та характеристик матеріалу [4]. Системний зв'язок між технологією виготовлення, мікроструктурою та механічними властивостями кобальто-хромових протезних конструкцій продемонстрували у своєму дослідженні Р. Падрос та співавтори (R. Padrós et al.). Це дозволяє розглядати якість результату моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці як інтегральний показник технологічної системи [5]. Огляд С. Сахи та С. Роя (S. Saha, S. Roy) доповнює ці результати аналізом механізмів зношування металевих імплантатів у межах усього життєвого циклу виробу, підкреслюючи необхідність врахування виробничих та експлуатаційних чинників у моделях моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці [6].

Значний обсяг досліджень присвячено сучасним адитивним і субтрактивним технологіям, які дедалі частіше розглядаються не ізольовано, а як елементи єдиного цифрового виробничого ланцюга. Й. Швайгер та співавтори (J. Schweiger et al.) узагальнюють сучасний стан тривимірного друку в протетичній стоматології, підкреслюючи взаємозалежність цифрової моделі, технології виготовлення та якості кінцевого виробу [7]. С. Піллаї та співавтори (S. Pillai et al.) зосереджують увагу на трансформації лабораторних цифрових рішень у клінічну практику, що вимагає системного узгодження технологічних параметрів на всіх етапах виготовлення [8]. Кількісне порівняння альтернативних технологічних маршрутів представлено в роботі К. Сона та співавторів (K. Son et al.), де порівнюється точність коронок, виготовлених методами стереолітографії (stereolithography, SLA), цифрової світлової обробки (digital light processing, DLP) та фрезерування, що створює основу для формалізованого вибору технології [9].

Завершальний комплекс праць концентрується на інтеграції інженерного моделювання, цифрових платформ і вихідних даних у єдиному аналітичному просторі. П. Лагуд та співавтори (P. Lahoud et al.) розглядають кінцево-елементне моделювання як основний інструмент персоналізованого комп'ютерного аналізу, що забезпечує прогнозування механічної поведінки зуботехнічних конструкцій на етапі проектування [10]. Ефективність відкритих систем CAD і тривимірного комп'ютерного дизайну для інтеграції технологічних процесів у парадигмі Четвертої промислової революції (Індустрії 4.0) доводять Б. Мругальська та співавтори (B. Mrugalska et al.) [11]. К. Суєсе (K. Suese) підкреслює визначальну роль цифрового

внутрішньоротового сканування як початкової ланки всього ланцюга моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці, від точності якої залежить якість наступних операцій [12]. Систематизацію досвіду застосування цифрових технологій виготовлення моделей у стоматології виконано І. А. Цолакисом та співавторами (I. A. Tsolakis et al.), які наголошують на потребі стандартизації процесів для підвищення відтворюваності результатів [13]. Аналітичне узагальнення точності різних технологій тривимірного друку подано А. Неметом та співавторами (A. Nemeth et al.) на основі мережевого метааналізу [14]. Водночас М. Панчал та співавтори (M. Panchal et al.) комплексно розглядають конструктивні, матеріалознавчі та технологічні аспекти виготовлення імплантатів, підкреслюючи потребу системного моделювання процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці [15].

**Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми.** Попри значні досягнення у цифровізації зуботехнічної практики, у наявних дослідженнях залишаються невіршеними питання цілісного системного моделювання процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці з урахуванням багатфакторних взаємозв'язків між обладнанням, матеріалами, режимами та цифровими інструментами. Більшість традиційних підходів мають локальний або емпіричний характер, що обмежує можливості прогнозування результатів, стандартизації технологічних рішень і забезпечення стабільної якості виробів в умовах варіативності виробничих параметрів. Запропоноване дослідження спрямоване на подолання зазначених прогалин шляхом обґрунтування системно орієнтованого підходу до моделювання технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці, систематизації їх структурних елементів і розроблення методологічних принципів управління процесами без емпіричних коректив. Це створює наукову основу для оптимізації технологічних режимів, підвищення керованості процесів і забезпечення стабільної якості зуботехнічних виробів.

**Метою статті** є розроблення та наукове обґрунтування системно орієнтованого підходу до моделювання технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці, спрямованого на підвищення ефективності, керованості та якості виробничих операцій у зуботехнічній практиці.

Для досягнення поставленої мети у статті передбачено розв'язання таких **завдань**:

1. Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці в умовах цифрової трансформації зуботехнічних лабораторій як цілісної технологічної системи.

2. Обґрунтувати методологічні принципи системного моделювання процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці з урахуванням їх багатфакторності та обмежень наявних цифрових рішень.

3. Розробити практичні рекомендації щодо застосування системного моделювання для оптимізації технологічних режимів і забезпечення стабільної якості зуботехнічних виробів.

**Матеріали та методи дослідження.** Дослідження ґрунтується на теоретичних і аналітичних матеріалах сучасних наукових публікацій, присвячених технологічним процесам моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці, цифровізації зуботехнічної практики та застосуванню системного аналізу в інженерних виробничих системах. Матеріалами дослідження слугували узагальнені характеристики технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці, параметри технологічних режимів, властивості стоматологічних матеріалів і функціональні особливості цифрово керованого обладнання зуботехнічних лабораторій. У роботі застосовано методи системного та структурно-функціонального аналізу, логічного й абстрактного узагальнення, порівняльного аналізу та формалізованого моделювання технологічних процесів. Використано метод декомпозиції для виділення ключових структурних елементів процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та метод ієрархічного узгодження параметрів для аналізу їх функціональних взаємозв'язків. Отримані результати інтерпретовано з позицій наукового обґрунтування можливостей оптимізації технологічних режимів і підвищення стабільності якості зуботехнічних виробів.

**Результати та обговорення.** Сучасні технологічні процеси моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці розвиваються в умовах інтенсивної цифрової трансформації зуботехнічних лабораторій. Це визначається масовим упровадженням CAD/CAM-систем, верстатів із числовим програмним керуванням (computer numerical control, CNC), цифрового внутрішнього і лабораторного сканування та програмних засобів технологічної підготовки виробництва. За таких умов

моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці трансформується з послідовності окремих механічних операцій у цілісний процес, керований цифровими системами, в межах якого визначальними стають якість цифрової геометричної моделі, коректність алгоритмів обробки та стабільність взаємодії обладнання, матеріалів і програмного забезпечення. Зростає значення системної узгодженості всіх елементів технологічного ланцюга, оскільки незначні відхилення параметрів у цифровому контурі можуть призводити до накопичення похибок і зниження клінічної якості ортопедичних конструкцій. Цифровізація процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці створює передумови для підвищення точності, відтворюваності та продуктивності виробництва, водночас ускладнюючи структуру управління технологічними процесами. Практика сучасних зуботехнічних лабораторій засвідчує зростання кількості параметрів, які підлягають одночасному контролю та взаємній оптимізації, що актуалізує потребу у формалізованому системному аналізі як методологічній основі оцінювання та вдосконалення процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці (табл. 1). Функціонування наведених технологічних рішень у сучасних умовах демонструє принципову зміну характеру виробничих процесів і професійної ролі зубного техника. Цифрова модель ортопедичної конструкції, сформована на етапі CAD, виконує роль керівного елемента технологічної системи, на основі якого формуються стратегії моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці з урахуванням фізико-механічних властивостей стоматологічних матеріалів, зокрема твердості, крихкості та абразивності.

На етапі CAM задані цифрові параметри трансформуються у керуючі програми для обладнання з CNC, що забезпечує прецизійне відтво-

рення складної просторової геометрії конструкцій з мінімальними відхиленнями. У практичній діяльності зуботехнічних лабораторій ефективність таких процесів підтверджується під час серійного виготовлення каркасів із діоксиду цирконію або керамічних вкладок, де стабільність параметрів обробки безпосередньо впливає на точність прилягання та довговічність виробів [12, с. 53–54]. Цифровий контроль якості, реалізований шляхом порівняння відсканованого виробу з еталонною CAD-моделлю, дає змогу виявляти систематичні похибки та коригувати параметри технологічного процесу без збільшення обсягів браку. За таких умов зубний техник переходить від ролі виконавця окремих операцій до оператора складної технологічної системи. Він приймає рішення на основі аналізу цифрових даних і прогнозування динаміки процесів, що підтверджує доцільність застосування системного аналізу в сучасній зуботехнічній практиці.

Процеси моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці доцільно інтерпретувати як складну технологічну систему, що поєднує матеріальні, інформаційні та керуючі компоненти, функціонування яких відбувається у тісній взаємозалежності. Такий підхід дозволяє відійти від фрагментарного розуміння окремих операцій і зосередитися на внутрішній логіці процесу, де стабільність і прогнозованість результатів визначаються узгодженістю структурних елементів і особливостями їх функціональних взаємозв'язків. У межах цієї системи кожен елемент не лише виконує власну технологічну функцію, а й впливає на параметри інших компонентів, формуючи єдине середовище управління якістю моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці. З позицій системного аналізу процес моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці функціонує як сукупність вхідних умов,

Таблиця 1

**Стан і тенденції розвитку технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці у цифрових зуботехнічних лабораторіях**

Компонент процесу	Традиційний підхід	Сучасний цифровий стан	Ключова тенденція
Проектування	Ручне або шаблонне моделювання	CAD-моделювання з цифровими бібліотеками	Інтеграція даних у єдиний цикл
Передача інформації	Фізичні моделі та зліпки	Цифрові файли та мережеві середовища	Скорочення часу та похибок
Механічна обробка	Напівавтоматичні операції	CAM-керована обробка з CNC	Підвищення стабільності
Контроль якості	Суб'єктивна візуальна оцінка	Цифрове зіставлення геометрії	Об'єктивізація контролю
Роль техника	Виконання операцій	Керування та корекція процесів	Зростання аналітичної функції

*Джерело: сформовано на основі [1; 3; 7; 8; 11, с. 298; 12, с. 53–54].*

внутрішніх перетворень і вихідних характеристик. Це потребує чіткої систематизації структурних елементів для забезпечення керованості та відтворюваності результатів у реальних умовах зуботехнічної практики (табл. 2).

У сучасних умовах виробництва структурні елементи процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці взаємодіють як складова цілісної технологічної системи, у якій інформаційні, матеріальні та керуючі компоненти поєднані спільною метою забезпечення заданих геометричних і функціональних характеристик ортопедичних конструкцій. Цифрова модель виробу виконує функцію системоутворювального елемента, оскільки вона детермінує допустимі параметри формоутворення, обмеження технологічних режимів і критерії оцінювання результатів механічної обробки. На її основі здійснюється узгодження вибору матеріалу заготовки, типу обладнання та стратегії обробки, що забезпечує внутрішню логічну цілісність технологічного процесу. Матеріал заготовки розглядається як змінна підсистема, властивості якої зумовлюють режими різання, геометрію ріжучого інструмента та динамічні характеристики процесу. Під час обробки матеріалів із різними фізико-механічними параметрами виникає необхідність оперативної адаптації програмних алгоритмів керування з метою збереження показників точності і запобігання недолікам поверхні [10]. Таке коригування здійснюється без зміни базової геометричної моделі, що свідчить про відокремлення інформаційного рівня комплексу від рівня технологічної реалізації. Система програмного керування забезпечує координацію рухів обладнання та реалізацію заданих режимів обробки відповідно до параметрів цифрової моделі й обмежень, зумовлених властивостями матеріалу та інструмента [5]. У цьому контексті система контролю та зворотного зв'язку виконує аналітичну функ-

цію, оскільки результати вимірювань використовуються для кількісного оцінювання відхилень і оперативного коригування параметрів процесу на наступних етапах обробки. Такий механізм зворотного зв'язку забезпечує адаптивність технологічної системи та підвищує стійкість процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці навіть за умов варіативності вихідних параметрів. Сукупна взаємодія структурних елементів створює передумови для формування керованої технологічної системи, здатної накопичувати дані, важливі для виробництва, аналізу причин відхилень і поступового вдосконалення технологічних режимів. Це обґрунтовує доцільність використання системного аналізу як наукового інструменту для інтерпретації процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та підвищення ефективності їх практичної реалізації в сучасних зуботехнічних лабораторіях. Моделювання технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці потребує методологічного підходу, що забезпечує відтворення закономірностей функціонування складної технологічної системи на основі формалізованих принципів. Використання системного аналізу як методологічної основи дає змогу систематизувати процеси моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці з позицій цілісності, ієрархічної організації та наявності причинно-наслідкових зв'язків між параметрами. У межах цього підходу модель розглядається як аналітичний інструмент, призначений для дослідження динаміки процесу, прогнозування результатів і наукового обґрунтування технологічних рішень, а не як допоміжний засіб опису вже реалізованих виробничих практик. Методологічна специфіка системного моделювання полягає у можливості відокремлення інформаційного рівня опису технологічного процесу від рівня його фізичної реалізації. Це створює підґрунтя для варіантного аналізу режимів

Таблиця 2

### Основні структурні елементи процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та їх функціональні взаємозв'язки

Структурний елемент	Функціональне призначення	Характер взаємодії з іншими елементами
Вихідні дані та цифрова модель	Формування геометричних і функціональних вимог до виробу	Задає параметри обробки та критерії оцінювання якості
Матеріал заготовки	Механічний вплив	Визначає допустимі режими обробки та вибір інструментів
Обладнання	Реалізація процесу формоутворення	Працює у взаємодії з програмним керуванням і матеріалом
Ріжучий інструмент	Формування поверхні та контуру	Забезпечує точність і стабільність обробки
Програмне керування	Координація рухів і режимів	Інтегрує цифрову модель з обладнанням
Контроль і зворотний зв'язок	Оцінювання відповідності результату	Забезпечує корекцію параметрів процесу

Джерело: сформовано на основі [2; 3; 4; 5; 9; 10].

моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та оцінювання їх впливу на кінцеві характеристики виробу до початку фактичного виготовлення (табл. 3).

Реалізація наведених методологічних принципів у виробничих умовах забезпечує побудову моделей, у яких процес моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці описується як керування системою з фіксованими вхідними змінними, внутрішніми станами та вихідними характеристиками. Відтак, ці моделі дозволяють науково обґрунтовано оцінювати вплив варіацій технологічних параметрів на точність формоутворення, шорсткість поверхні та стабільність геометричних характеристик конструкцій. У практичному контексті це виявляється у можливості попереднього порівняльного аналізу різних стратегій обробки без внесення змін у фактичний виробничий процес [10]. Системно орієнтовані моделі забезпечують інструментальну основу для аналізу чутливості процесу до матеріальних змін і технологічних обмежень. Наприклад, у разі переходу на інший тип матеріалу або змін технічних характеристик обладнання модель дозволяє визначити критичні параметри, перевищення яких може призвести до втрати точності або стійкості процесу. Це дає змогу коригувати режими обробки на етапі технологічної підготовки виробництва, мінімізуючи кількість експериментальних ітерацій. Узагальнення результатів моделювання на основі системного аналізу створює підґрунтя для поступового переходу від інтуїтивного налаштування технологічних процесів до стандартизованого керування зубообробкою. Цей стандартизований процес орієнтований на прогнозування, оптимізацію та відтворюваність результатів у сучасній зуботехнічній практиці.

Побудова й застосування системних моделей у зуботехнічній практиці супроводжується комплексом науково-практичних проблем, зумовлених складною природою технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та обмеженнями сучасного цифрового інструментарію. Однією з базових проблем є висока бага-

тофакторність процесів, у межах якої одночасно взаємодіють геометричні, технологічні, матеріалознавчі й керуючі параметри, що ускладнює формалізацію їх впливів і побудову адекватних причинно-наслідкових залежностей. Нелінійний характер таких взаємозв'язків обмежує можливості застосування спрощених моделей і знижує точність прогнозування результатів обробки за змінних умов [14]. Суттєвою проблемою постає варіативність властивостей стоматологічних матеріалів, яка в межах однієї групи матеріалів може виявлятися у відмінностях мікроструктури, щільності та механічної поведінки під час обробки. Це призводить до зниження узагальнювальної здатності моделей і потребує їх адаптації до конкретних партій матеріалів або навіть окремих заготовок, що ускладнює стандартизацію технологічних рішень. Обмежена репрезентативність вихідних даних погіршує точність калібрування моделей і може спричинити систематичні похибки. Окремим проблемним аспектом є невідповідність між аналітичною складністю системних моделей і практичними вимогами до оперативності ухвалення технологічних рішень у зуботехнічних лабораторіях [15, с. 1865]. Надмірна деталізація моделей підвищує їх обчислювальні витрати і ускладнює інтеграцію в реальні виробничі процеси, водночас спрощення структури знижує адекватність опису процесів. Додаткові обмеження пов'язані з функціональною закритістю більшості наявних цифрових рішень, які орієнтовані на окремі етапи виробничого циклу та не забезпечують повноцінної інтеграції системного моделювання з технологічним обладнанням. Науково-практичною проблемою також залишається обмеженість механізмів зворотного зв'язку, оскільки результати контролю якості не завжди формалізуються у вигляді даних, придатних для автоматизованої корекції моделей. Це знижує адаптивність системних моделей і зберігає залежність технологічних рішень від професійного досвіду виконавця.

Практичне використання системного моделювання в зуботехнічній практиці доцільно оріє-

Таблиця 3

**Методологічні принципи моделювання технологічних процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці на основі системного аналізу**

Методологічний принцип	Зміст принципу	Значення для моделювання
Цілісність	Розгляд процесу як єдиної системи	Забезпечення узгодженості рішень
Структурна ієрархія	Поділ системи на рівні та підсистеми	Координація параметрів різного рівня
Причинно-наслідкова визначеність	Формалізація взаємних впливів параметрів	Можливість прогнозування результатів
Динамічний підхід	Урахування змін параметрів у часі	Аналіз стійкості процесу
Принцип зворотного зв'язку	Корекція моделі за результатами оцінювання	Адаптація моделі до реальних умов

Джерело: сформовано на основі [2; 3; 4; 10; 14].

ентувати на оптимізацію технологічних режимів як керованого процесу з визначеними межами допустимих параметрів і прогнозованими результатами. Насамперед це передбачає застосування моделей для попереднього аналізу режимів обробки на етапі технологічної підготовки виробництва, що дає змогу встановлювати оптимальні поєднання швидкості, подачі, глибини різання та траєкторій інструмента з урахуванням конкретних властивостей матеріалу та технічних характеристик обладнання. Такий підхід знижує потребу в пробних ітераціях і дає змогу мінімізувати ризик появи систематичних дефектів ще до початку фактичної обробки. Забезпечення стабільної якості зуботехнічних виробів досягається шляхом використання системних моделей як інструменту контролю та корекції процесу, коли результати проміжних і фінальних вимірювань інтерпретуються не ізольовано, а в контексті всієї технологічної системи. Аналіз відхилень геометричних або поверхневих характеристик виробів у межах моделі дає змогу ідентифікувати критичні параметри процесу, що впливають на якість, і здійснювати їх цілеспрямовану корекцію без радикальної зміни всієї технологічної схеми. Це створює передумови для підтримання стабільності результатів навіть за умов варіативності матеріалів або експлуатаційних характеристик обладнання. У практичному аспекті доцільно орієнтувати системне моделювання на накопичення й узагальнення виробничих даних, що формуються в процесі серійного виготовлення виробів. Використання таких даних для уточнення параметрів моделей підвищує їх адекватність і дає змогу поступово адаптувати технологічні режими до реальних умов експлуатації без втрати відтворюваності результатів. У результаті системне моделювання переходить від разового інструмента оптимізації до постійного елемента управління якістю, який підтримує прийняття технологічних рішень на основі аналізу закономірностей, а не індивідуального досвіду. Реалізація зазначених рекомендацій сприятиме формуванню стійкої технологічної практики, у межах якої оптимізація режимів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці та забезпечення стабільної якості виробів здійснюються на науково обґрунтованій основі. Це підвищить надійність виробничих процесів, мінімізує появу дефектів та створить умови для стандартизації технологічних рішень у сучасній зуботехнічній практиці.

**Висновки.** У ході дослідження встановлено, що процеси моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці в сучасній зуботехнічній практиці мають системний характер і визначаються взаємодією інформаційних, матеріальних і керую-

чих компонентів у межах єдиного технологічного циклу. Доведено, що застосування системного аналізу як методологічної основи моделювання забезпечує формалізований опис технологічних процесів, виявлення причинно-наслідкових зв'язків між параметрами та підвищення прогнозованості результатів обробки, зменшуючи залежність виробничих рішень від емпіричних підходів. Виявлено, що основними науково-практичними проблемами побудови й застосування системних моделей є багатофакторність і нелінійність процесів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці, варіативність властивостей стоматологічних матеріалів, обмежена репрезентативність виробничих даних і фрагментованість наявних цифрових рішень, що ускладнює інтеграцію моделей у реальні умови виробництва та знижує їх адаптивність. Спираючись на ці висновки, рекомендовано використовувати системне моделювання на етапах технологічної підготовки та контролю виробництва для оптимізації режимів моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці, ідентифікації критичних параметрів процесу й забезпечення стабільної якості зуботехнічних виробів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком адаптивних системних моделей, удосконаленням механізмів зворотного зв'язку та розширенням їх прогностичних можливостей для стандартизованого управління процесами моделювання конструкцій в зуботехнічній практиці.

#### Література:

1. Pang M., Zhao X., Lu D., Dong Y., Jiang L., Li J., Ji P. Preliminary user evaluation of a new dental technology virtual simulation system: development and validation study. *JMIR Serious Games*. 2022. Vol. 10, № 3. Article e36079. DOI: <https://doi.org/10.2196/36079>
2. Bioengineering Tools Applied to Dentistry: Validation Methods for In Vitro and In Silico Analysis / J. D. M. d. Matos et al. *Dentistry Journal*. 2022. Vol. 10, no. 8. P. 145. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj10080145>
3. Dobrzański L. A., Dobrzański L. B. Dentistry 4.0 concept in the design and manufacturing of prosthetic dental restorations. *Processes*. 2020. Vol. 8, № 5. Article 525. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8050525>
4. Ilie F., Saracin I. A., Voicu G. Study of Wear Phenomenon of a Dental Milling Cutter by Statistical–Mathematical Modeling Based on the Experimental Results. *Materials*. 2022. Vol. 15, № 5. Article 1903. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15051903>
5. Padrós R., Punset M., Molmeneu M., Velasco A. B., Herrero-Climent M., Rupérez E., Gil F. J. Mechanical properties of CoCr dental-prosthesis restorations made by three manufacturing processes: influence of the microstructure and topography. *Metals*. 2020. Vol. 10, № 6. Article 788. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10060788>
6. Saha S., Roy S. Metallic dental implants wear mechanisms, materials, and manufacturing processes: a literature review. *Materials*. 2022. Vol. 16, № 1. Article 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16010161>

7. Schweiger J., Edelhoff D., Güth J. F. 3D printing in digital prosthetic dentistry: an overview of recent developments in additive manufacturing. *Journal of Clinical Medicine*. 2021. Vol. 10, № 9. Article 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcm10092010>

8. Pillai S., Upadhyay A., Khayambashi P., Farooq I., Sabri H., Tarar M., Tran S. D. Dental 3D-printing: transferring art from the laboratories to the clinics. *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 1. Article 157. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13010157>

9. Son K., Lee J. H., Lee K. B. Comparison of intaglio surface trueness of interim dental crowns fabricated with SLA 3D printing, DLP 3D printing, and milling technologies. *Healthcare*. 2021. Vol. 9, № 8. Article 983. DOI: <https://doi.org/10.3390/healthcare9080983>

10. Lahoud P., Faghihian H., Richert R., Jacobs R., EzEldeen M. Finite element models: a road to in-silico modeling in the age of personalized dentistry. *Journal of Dentistry*. 2024. Vol. 150. Article 105348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105348>

11. Mrugalska B., Dovramadjiev T., Pavlova D., Filchev R., Stoeva M., Bozhikova V., Dimova R. Open source systems and 3D computer design applicable in the dental medical engineering Industry 4.0—sustainable concept. *Procedia Manufacturing*. 2021. Vol. 54. P. 296–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.09.002>

12. Suese K. Progress in digital dentistry: the practical use of intraoral scanners. *Dental Materials Journal*. 2020. Vol. 39, № 1. P. 52–56. DOI: <https://doi.org/10.4012/dmj.2019-224>

13. Tsolakis I. A., Gizani S., Panayi N., Antonopoulos G., Tsolakis A. I. Three-dimensional printing technology in orthodontics for dental models: a systematic review. *Children*. 2022. Vol. 9, № 8. Article 1106. DOI: <https://doi.org/10.3390/children9081106>

14. Nemeth A., Vitai V., Czumbel M. L., Szabo B., Varga G., Keremi B., Borbely J. Clear guidance to select the most accurate technologies for 3D printing dental models: a network meta-analysis. *Journal of Dentistry*. 2023. Vol. 134. Article 104532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104532>

15. Panchal M., Khare S., Khamkar P., Bhole K. S. Dental implants: a review of types, design analysis, materials, additive manufacturing methods, and future scope. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 68. P. 1860–1867. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.049>

### References:

1. Pang, M., Zhao, X., Lu, D., Dong, Y., Jiang, L., Li, J., & Ji, P. (2022). Preliminary user evaluation of a new dental technology virtual simulation system: Development and validation study. *JMIR Serious Games*, 10(3), e36079. <https://doi.org/10.2196/36079>

2. Matos, J. D. M. d., Queiroz, D. A., Nakano, L. J. N., Andrade, V. C., Ribeiro, N. d. C. R., Borges, A. L. S., Bottino, M. A., & Lopes, G. d. R. S. (2022). Bioengineering Tools Applied to Dentistry: Validation Methods for In Vitro and In Silico Analysis. *Dentistry Journal*, 10(8), 145. <https://doi.org/10.3390/dj10080145>

3. Dobrzański, L. A., & Dobrzański, L. B. (2020). Dentistry 4.0 concept in the design and manufacturing of prosthetic dental restorations. *Processes*, 8(5), 525. <https://doi.org/10.3390/pr8050525>

4. Ilie, F., Saracin, I. A., & Voicu, G. (2022). Study of wear phenomenon of a dental milling cutter by statis-

tical–mathematical modeling based on the experimental results. *Materials*, 15(5), 1903. <https://doi.org/10.3390/ma15051903>

5. Padrós, R., Punset, M., Molmeneu, M., Velasco, A. B., Herrero-Climent, M., Rupérez, E., & Gil, F. J. (2020). Mechanical properties of CoCr dental-prosthesis restorations made by three manufacturing processes: Influence of the microstructure and topography. *Metals*, 10(6), 788. <https://doi.org/10.3390/met10060788>

6. Saha, S., & Roy, S. (2022). Metallic dental implants wear mechanisms, materials, and manufacturing processes: A literature review. *Materials*, 16(1), 161. <https://doi.org/10.3390/ma16010161>

7. Schweiger, J., Edelhoff, D., & Güth, J. F. (2021). 3D printing in digital prosthetic dentistry: An overview of recent developments in additive manufacturing. *Journal of Clinical Medicine*, 10(9), 2010. <https://doi.org/10.3390/jcm10092010>

8. Pillai, S., Upadhyay, A., Khayambashi, P., Farooq, I., Sabri, H., Tarar, M., & Tran, S. D. (2021). Dental 3D-printing: Transferring art from the laboratories to the clinics. *Polymers*, 13(1), 157. <https://doi.org/10.3390/polym13010157>

9. Son, K., Lee, J. H., & Lee, K. B. (2021). Comparison of intaglio surface trueness of interim dental crowns fabricated with SLA 3D printing, DLP 3D printing, and milling technologies. *Healthcare*, 9(8), 983. <https://doi.org/10.3390/healthcare9080983>

10. Lahoud, P., Faghihian, H., Richert, R., Jacobs, R., & EzEldeen, M. (2024). Finite element models: A road to in-silico modeling in the age of personalized dentistry. *Journal of Dentistry*, 150, 105348. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105348>

11. Mrugalska, B., Dovramadjiev, T., Pavlova, D., Filchev, R., Stoeva, M., Bozhikova, V., & Dimova, R. (2021). Open source systems and 3D computer design applicable in the dental medical engineering Industry 4.0—sustainable concept. *Procedia Manufacturing*, 54, 296–301. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.09.002>

12. Suese, K. (2020). Progress in digital dentistry: The practical use of intraoral scanners. *Dental Materials Journal*, 39(1), 52–56. <https://doi.org/10.4012/dmj.2019-224>

13. Tsolakis, I. A., Gizani, S., Panayi, N., Antonopoulos, G., & Tsolakis, A. I. (2022). Three-dimensional printing technology in orthodontics for dental models: A systematic review. *Children*, 9(8), 1106. <https://doi.org/10.3390/children9081106>

14. Nemeth, A., Vitai, V., Czumbel, M. L., Szabo, B., Varga, G., Keremi, B., & Borbely, J. (2023). Clear guidance to select the most accurate technologies for 3D printing dental models: A network meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 134, 104532. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104532>

15. Panchal, M., Khare, S., Khamkar, P., & Bhole, K. S. (2022). Dental implants: A review of types, design analysis, materials, additive manufacturing methods, and future scope. *Materials Today: Proceedings*, 68, 1860–1867. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.049>

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 30.12.2025