

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТАРАСОВ НІКІТА АНДРІЙОВИЧ

УДК 004.92 : 681.3

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ШРИФТУ БРАЙЛЯ ЗА
ДОПОМОГОЮ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ

126 – Інформаційні системи та технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі інформаційних технологій.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Н. А. Тарасов

Науковий керівник – Хамула Орест Григорович, кандидат технічних наук, професор

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Тарасов Н.А. Інформаційна технологія формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2025.

У дисертації розроблено інформаційну технологію, яка забезпечує генерацію шрифту Брайля зі звичайного введеного тексту та дозволяє створити стандартну прямокутну тактильну 3D-модель у форматі STL. Додатково, технологія виконує аналіз 3D-моделей на відповідність стандартам розміру крапок Брайля. У застосунку є можливість конвертувати зображення з формату PNG/JPEG у 3D-модель у форматі STL. Крім того, реалізовано калькулятор прогнозування для оцінки якості формування шрифту Брайля залежно від параметрів різних технологій 3D-друку.

У дисертаційній роботі розглянуто проблематику відтворення рельєфно-крапкових зображень (шрифту Брайля) за допомогою 3D-моделювання та 3D-друку. Проаналізовано шляхи розв'язання проблем, пов'язаних із формуванням таких зображень із застосуванням сучасних поліграфічних технологій. Зазначені технології сприяють інтеграції людей з порушеннями зору в суспільні процеси, що відповідає європейським вимогам інклюзивної політики підтримки осіб з інвалідністю.

На основі проведеного аналізу встановлено, що SLA-DLP та FDM є оптимальними технологіями для створення 3D-моделей шрифту Брайля завдяки їх високій точності та стійкості. Переваги 3D-друку включають швидке відтворення моделей для незрячих осіб, хоча процес складний і потребує оптимізації. Важливо враховувати програмне забезпечення, матеріали та параметри друку для забезпечення якості рельєфно-крапкових моделей. Дослідження показали, що

удосконалення процесу можливе через застосування математичного моделювання і врахування ключових факторів. Розроблено підхід до оптимізації формування шрифту, включаючи аналіз впливу матеріалів та параметрів 3D-друку на якість рельєфних крапок. Запропоновано підхід до усунення виявлених недоліків через застосування обґрунтованих критеріїв та оптимальних технологічних рішень на етапах 3D-моделювання й 3D-друку. Досліджено параметри тривимірного об'єкта, відтвореного за допомогою 3D-принтера. Створено математичні моделі для дослідження якості формування рельєфно-крапкових крапок. На основі результатів науково-аналітичних досліджень, отримано дані про вплив матеріалів для 3D-друку на якість формування цих крапок.

Дисертація складається з п'яти розділів.

Дисертація присвячена дослідженню технологічних аспектів формування шрифту Брайля, за допомогою програмних засобів 3D-моделювання та технологій адитивного виробництва.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження. Охарактеризовано методи дослідження та їх результати, висвітлено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів. Наведено відомості про їх оприлюднення та апробації, описано структуру та обсяг наукової роботи. Також окреслено етапи дослідження процесу формування шрифту Брайля.

У першому розділі розглянуто поняття 3D-моделювання, його види та програмне забезпечення, проведено їх порівняльний аналіз. Також проаналізовано технології 3D-друку та 3D-принтерів, їх особливості та висвітлено особливості використання різних матеріалів для 3D-друку. Окрему увагу приділено перевагам і недолікам застосування адитивних технологій для формування шрифту Брайля в контексті інклюзивної освіти.

У другому розділі розглянуто фактори, що впливають на вибір технології, створення 3D-моделей і формування шрифту Брайля їх виведення на друк за

допомогою 3D-принтера. Проаналізовано програмне забезпечення для 3D-моделювання, вплив матеріалів для 3D-друку на якість 3D-моделей, види 3D-принтерів та особливості їхньої роботи. Також виокремлено фактори впливу, на основі яких здійснено детальне порівняння етапів розроблення – від формування шрифту Брайля до друку на 3D-принтері.

У третьому розділі побудовано семантичну мережу факторів, що впливають на формування шрифту Брайля. Синтезовано багаторівневі моделі пріоритетного впливу цих факторів на процес створення та якість шрифту Брайля на 3D-моделях за допомогою методу аналізу ієрархій. Розроблено й досліджено концептуальну модель 3D-моделювання, яка дає змогу оцінити фактори, що впливають на формування шрифту Брайля. Для вирішення цього завдання здійснено формалізоване відображення відношень представлення взаємозв'язків між факторами-процесами за допомогою розробленої семантичної мережі – математичної моделі у вигляді орієнтованого графа, вершини якого – фактори процесу створення 3D-моделей із текстом Брайля, а дуги відображають зв'язки між ними, зміст яких описано лінгвістично. Така модель дає змогу застосовувати математичний апарат теорії моделювання для вивчення особливостей впливу різних факторів і процесів на якість формування шрифту Брайля в умовах адитивного виробництва.

На основі семантичного представлення факторів і процесів розроблено початкову багаторівневу модель впливу на якість формування шрифту Брайля за допомогою методу математичного моделювання ієрархій. У її основу покладено матрицю досяжності, побудовану за результатами аналізу семантичної мережі, а також ітераційні таблиці для визначення рівнів важливості факторів. Синтезовано удосконалену багаторівневу модель факторів із застосуванням методу ранжування та методу визначення вагомості предикатів. Вагові значення факторів у семантичній мережі оптимізовано на основі матриці попарних порівнянь, сформованої за шкалою відносної важливості об'єктів з урахуванням моделі,

отриманої на попередньому етапі дослідження. На основі обчислень визначено оптимальні вагові значення факторів, індекс і ступінь узгодженості; синтезовано оптимізовану модель пріоритетного впливу факторів на якість формування шрифту Брайля. Для визначення оптимального варіанта реалізації було сформовано та розраховано альтернативні рішення на основі методу лінійного зростання із застосуванням функцій корисності та часток ефективності факторів у варіантах. За критерієм максимального значення об'єднаного функціоналу визначено оптимальний варіант процесу формування шрифту Брайля.

У четвертому розділі розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології, яка дає змогу оцінювати пріоритетні фактори, що впливають на якість формування шрифту Брайля в різних технологіях 3D-друку, до складу моделі входять: інформаційна база вихідних даних, методи й моделі оцінювання якості формування шрифту Брайля, нечітка система прогностичного оцінювання пріоритетів залежно від застосування різних технологій 3D-друку, зокрема FDM-FFF, SLA-DLP, PolyJet, SLS. Наведено математичне трактування ключових понять, що становлять основу теорії нечітких множин. Здійснено групування лінгвістичних змінних за функціональними ознаками та розроблено структуровану вихідну базу даних. Ця база пов'язує позначення змінної з її лінгвістичною суттю, межами значень універсальної терм-множини та встановленими лінгвістичними термами, заданими за допомогою нечіткої шкали, яка відображає якісні характеристики змінної. Розроблено ієрархічну модель логічного виведення, що репрезентує логіку оцінювання якості формування шрифту Брайля засобами 3D-моделювання, відповідно до виділених груп лінгвістичних змінних. Створено інформаційну вихідну базу даних, яка пов'язує позначення змінної з її лінгвістичною сутністю, межі значень універсальної терм-множини із встановленими лінгвістичними термами, заданими за нечіткою шкалою, що відображають якісну характеристику змінної. Побудовано та опрацьовано матриці попарних порівнянь для лінгвістичних термів; визначено їх

ранги. На основі отриманих рангів обчислено значення функцій належності для кожного терму. Здійснено нормування значень функцій належності лінгвістичних змінних відносно задекларованих визначених лінгвістичних термів і їх подання у вигляді нечітких множин, у яких кожне значення функції належності прив'язано до відповідної точки поділу універсальної бази значень. На підставі отриманих нечітких множин здійснено візуалізацію функцій належності у вигляді суміщених графіків, які віднесено до відповідних термів. Сформовано нечіткі бази знань (матриці), на основі яких запроєктовано системи нечітких логічних рівнянь, що стосуються лінгвістичних змінних другого рівня ієрархії моделі логічного виведення. Це дозволило провести логічне оцінювання та визначити початкові значення лінгвістичних змінних, а також, на основі наведених вище даних, розрахувати прогнозований показник рівня якості формування шрифту Брайля.

У п'ятому розділі представлено систему для формування шрифту Брайля, яка охоплює всі етапи – від 3D-модельовання до виведення тривимірної моделі на 3D-принтері з урахуванням рельєфно-крапкового шрифту Брайля. Також проведено аналіз та виконано прогностичні оцінки якості тактильної моделі.

На основі проведених досліджень й аналізу встановлено взаємозв'язок основних параметрів відтворення 3D-моделі з рельєфно-крапкових зображень і процесом формування шрифту Брайля за допомогою адитивних технологій друкарської форми на 3D-моделях. Результати досліджень підтвердили високу якість формування рельєфно-крапкових зображень та відповідність властивостей крапок шрифту Брайля вимогам нормативно-технічних документів. На основі проведених досліджень та порівняльного аналізу було розроблено нові вимоги до нанесення рельєфно-крапкових зображень із застосуванням 3D-технологій. Дослідження на підприємстві підтвердили, що удосконалений технологічний процес формування шрифту Брайля на 3D-моделях забезпечує високу якість відтворення, відповідає всім нормативним вимогам і має високу техніко-економічну ефективність.

У висновках наведено результати наукового дослідження, які засвідчують удосконалення технологій 3D-моделювання та 3D-друку для нанесення шрифту Брайля.

У дисертаційному дослідженні розв'язано науково-прикладне завдання розроблення інформаційної технології формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання. На основі проведених у межах цієї роботи досліджень отримано такі результати:

уперше:

- формалізовано зв'язки між факторами якості формування шрифту Брайля у процесах адитивного виробництва та параметрами якості формування шрифту Брайля на основі семантичних мереж і мови логіки предикатів, що дозволило забезпечити теоретичне підґрунтя для подальших досліджень;
- синтезовано багаторівневі моделі пріоритетності для виокремлених факторів впливу і процесів формування шрифту Брайля, визначено оптимальний варіант реалізації цих процесів на основі методів математичного моделювання ієрархій, ранжування та лінійного згортання критеріїв, внаслідок чого отримано структуровану інформаційну базу даних;
- розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології оцінювання пріоритетності факторів і процесів, що впливають на якість формування шрифту Брайля на 3D-моделях, призначених для незрячих людей;
- виконано генерування тривимірних моделей із текстом Брайля на основі параметрів за замовчування або встановлених користувачем параметрів; здійснено конвертацію зображень у тривимірну модель з подальшим розширенням цього функціоналу; оцінювання відповідності розмірів крапок шрифту Брайля нормативним стандартам; виконано прогностичне оцінювання якості тривимірних моделей із врахуванням тексту, типу технологій 3D-друку та інших параметрів;

удосконалено:

- процес визначення пріоритетних факторів впливу на якість формування шрифту Брайля та рекомендації щодо використання технологій 3D-друку і тривимірного моделювання;

отримало подальший розвиток:

- концепція формування й обґрунтування пріоритетних чинників, які впливають на якість формування шрифту Брайля; застосування сучасних інформаційних технологій у процесах адитивного виробництва; вдосконалення функціоналу програмних забезпечень програмного забезпечення для 3D-моделювання моделей Брайля; використання штучного інтелекту з встановленими рекомендаціями щодо його інтеграції для підвищення якості створення брайлівських моделей Брайля; оцінювання якості та розпізнавання тривимірних об'єктів за допомогою комп'ютерного зору й нейронних мереж.

Результати дисертаційної роботи та наукових досліджень використано в науково-дослідницькій роботі, а також у лекційних курсах і практичних заняттях для студентів Української академії друкарства (інститут поліграфії та медійних технологій НУ «Львівська політехніка»), зокрема під час проведення експериментальних досліджень та апробації в умовах навчально-реабілітаційного центру «Левеня». Дані про впровадження підтверджено відповідними документами.

Ключові слова: пріоритетність, семантична мережа, багаторівнева модель, матриця досяжності, мова логіки предикатів, програмне забезпечення, нечіткі множини, нейронна мережа, шрифт Брайля, тактильне сприйняття, машинне навчання, комп'ютерний зір, нечітка логіка, 3D-друк та 3D-моделювання, адитивні технології.

ABSTRACT

Tarasov N.A. Information technology for Braille font formation using 3D modeling.— Qualifications scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 126 Information Systems and Technologies. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025.

The dissertation develops an information technology that provides Braille generation from regular input text and allows you to create a standard rectangular tactile 3D model in STL format. Additionally, the technology analyzes 3D models for compliance with Braille dot size standards. The application has the ability to convert images from PNG/JPEG format to a 3D model in an STL file. In addition, a predictive calculator has been implemented to assess the quality of Braille formation in various 3D printing technologies, which considers the quality according to the set parameters.

The dissertation examines the issues of reproducing relief dot images (Braille) using 3D modeling and 3D printing. Ways of solving the problems of formation using modern printing technologies are considered. Such technologies contribute to the integration of people with visual impairments into social processes, which meets the European requirements of an inclusive policy of supporting people with special needs.

Based on the analysis and research of scientific works, experiments, and technologies for forming Braille, it was found that the SLA and DLP 3D printing formats are one of the optimal solutions for creating 3D tactile information tools for people with special needs. The advantages of 3D printing and 3D modeling technologies are the ability to quickly and with high accuracy print various 3D models for blind people, as well as to ensure high resistance of relief elements to mechanical stress in an inclusive environment. The main components of this technological process are modeling software, 3D printing materials, and 3D printers that reproduce models using various methods and materials. However, there are a number of disadvantages: there is no specialized software for

creating 3D models for forming relief dots; the complexity of the technological process of reproducing models, which contains a large number of operations and is costly and time-consuming; possible negative impacts on the environment.

The listed disadvantages determine the need to improve the technological process of forming Braille using 3D modeling and additive technologies with optimal parameters and considering factors that affect the quality of Braille formation. To ensure high-quality formation of Braille on 3D models intended for tactile use by blind people, it is necessary to: choose the optimal software for creating 3D models and forming relief-dot points with high accuracy, take into account key factors and parameters for high-quality 3D printing, ensure environmental friendliness and safety of the materials used, establish the necessary technological parameters and process modes, and also study the properties and geometric parameters of relief-dot models that ensure high quality and reliability of reading information by people with visual impairments and the blind.

It has been established that additive technologies in the formation of relief-dot fonts for the blind have a number of advantages but also reveal certain disadvantages. The main technological tools for 3D modeling are software as well as a device for outputting a three-dimensional object, i.e., a 3D printer. These components require some analysis and experimental research.

Based on the analysis of scientific research in the field of Braille font formation using modern additive technologies, several tasks have been identified in the following areas of scientific research: implementation of a model of the technological process of forming a relief-dot font on objects using 3D printers, as well as improving the technical quality of font formation using existing additive technologies thanks to new scientifically based solutions. It was found that some of the research is aimed at improving the process of forming a Braille font using existing technologies, but they do not solve the problem of creating a fast and high-quality formation of a relief-dot font on three-dimensional objects. An analysis of scientific research on the process of font formation and factors affecting the quality of its reproduction was conducted, but existing developments do not

consider the peculiarities of factors influencing the reproduction of Braille using 3D technologies. An approach to eliminating existing shortcomings in the formation of Braille using 3D modeling and 3D printers by applying certain criteria and technologies is proposed. The parameters of the reproduced three-dimensional object using a 3D printer were studied. Mathematical models were created to study the quality of the formation of relief dots. According to the results of scientific and analytical research, certain data has been obtained on the influence of materials for 3D printing on the formation of dots.

The dissertation consists of five sections.

The dissertation is devoted to the study of Braille font formation using 3D modeling software.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulates the goal and objectives of the research, defines the object and subject of the research. The research methods and their results are characterized, the scientific novelty and practical value of the results are highlighted. Information on their publication and testing is provided, the structure and scope of the scientific work are described. The main stages and research on Braille font formation are described.

The first section considers the concept of 3D modeling, what types exist, software, and their comparative analysis is conducted. 3D printing technologies and 3D printers, their features and analysis of materials used for 3D printing are also considered. Special attention is paid to the advantages and disadvantages of using additive technologies for Braille formation in the context of inclusive education.

The second section considers the factors influencing the choice of technology, the creation of 3D models and Braille formation, and printing using a 3D printer. The software for 3D modeling, the influence of materials for 3D printing on models, types of 3D printers and their features of operation are considered. The influencing factors are also identified, on the basis of which a detailed comparison of the above development stages from Braille formation to printing on a 3D printer is carried out.

In the third section, a semantic network of factors is constructed. Multilevel models

of the priority influence of these factors on the formation process and quality of Braille on 3D models built on the basis of models are synthesized using the methods of hierarchy analysis. A conceptual model of 3D modeling that evaluates the factors influencing the formation of Braille is developed and investigated. To solve this problem, a formalized representation of the relationships between factors-processes was carried out using the developed semantic network - a mathematical model, which is a directed graph, the vertices of which are the factors of the process of creating 3D models with Braille text, and the arcs are the relationships between factors, the linguistic essence of which is conveyed in each arc. Such a model provides the opportunity to use the mathematical apparatus of modeling theory to study the features of the influence of various factors and processes on the quality of Braille font formation in additive manufacturing. Based on the semantic representation of the factors-processes, an initial multilevel model of factors influencing the quality of Braille font formation was developed using the method of mathematical modeling of hierarchies, which is based on the reachability matrix built on the basis of the semantic network and iterative tables for determining the levels of importance of factors. An improved multilevel model of factors was synthesized using the ranking method and the method for determining the weight of predicates. The weight values of factors in the semantic network were optimized based on a matrix of pairwise comparisons, built on the scale of relative importance of objects, taking into account the model obtained at the previous stage of the study. Based on the data obtained, the optimal weight values of factors, the consistency index on the consistency ratio were calculated; an optimized model of the priority influence of factors on the quality of Braille font formation was synthesized. To determine the optimal implementation option, alternative options were formed and calculated based on the linear growth method using utility functions and efficiency shares of factors in the options. The optimal option of Braille font formation processes was calculated and determined according to the criterion of the maximum value of the combined functional.

In the fourth section, a structural and functional model of information technology is developed, which assesses the priority factors affecting the quality of Braille formation in various 3D printing technologies, which includes an information base of source data, methods and models for assessing the quality of Braille formation, a fuzzy system for predictive assessment of priorities based on the use of various 3D printing technologies, namely FDM-FFF, SLA-DLP, PolyJet, SLS. A mathematical interpretation of the key concepts that form the basis of the theory of fuzzy sets is presented. After that, linguistic variables are grouped by functional features, and a structured source database is developed. This database connects the designation of a variable and its linguistic essence, the boundaries of the values of the universal term set, and linguistic terms are established, given by a fuzzy scale, which express the qualitative property of the variable. A hierarchical model of logical inference has been developed, which reflects the logic of assessing the quality of Braille formation using 3D modeling, in accordance with the selected groups of linguistic variables. An information source database has been created, which connects the designation of a variable with its linguistic essence, the boundaries of the values of the universal term set, and linguistic terms given by a fuzzy scale, which express the qualitative property of the variable, have been established. Pairwise comparison matrices for linguistic terms have been constructed and processed; ranks of linguistic terms have been determined. Based on these ranks, the values of membership functions for each term have been calculated. The values of membership functions of linguistic variables have been normalized relative to the declared linguistic terms and their representation by fuzzy sets, in which each weight of the membership function is tied to the corresponding division point of the universal value base. Based on the obtained fuzzy sets, the membership functions were visualized by combined graphs assigned to the corresponding terms. Fuzzy knowledge bases (matrices) were formed and based on them, fuzzy logical equation systems were designed for linguistic variables of the second level of the hierarchy of the logical inference model. This allowed for a logical evaluation and

determination of the initial values of linguistic variables, and also, based on the above data, a predicted indicator of the quality level of Braille font formation was calculated.

In the fifth section, a system for Braille font formation was developed, which covers the stages from the process of developing a system for 3D modeling to the output of a three-dimensional model on a 3D printer, taking into account the relief-dot Braille font. Analysis and predictive assessments of the quality of the future tactile model were also performed.

Based on the conducted research and analysis, the relationship between the main parameters of the reproduction of a 3D model from relief-dot images and the process of forming a Braille font using additive technologies of a printing form on 3D models was determined. The conducted research confirmed the high quality of the formation of relief-dot images and the properties of Braille dots, which meet the requirements of regulatory and technical documents. Based on the conducted research and comparative analysis, new requirements were developed for applying relief-dot images using 3D technologies. The conducted research at the enterprise confirms that the improved technological process of forming a Braille font on 3D models provides high quality reproduction, meets all requirements and has high technical and economic efficiency.

The conclusions highlight the results of scientific research, which reflect improvements in the technology of 3D modeling and 3D printing for applying Braille.

The dissertation research solved the scientific and applied task of developing an information technology for forming Braille using 3D modeling. Based on the results of research conducted within the framework of the dissertation work, the following results were obtained:

for the first time:

- the formalization of the relationships between the factors of the quality of Braille formation in additive manufacturing processes and the parameters of the quality of Braille formation was carried out based on semantic networks and the language of predicate logic, which allowed providing a theoretical basis for further research;

- multilevel models of the priority of the influence of the selected factors and processes that affect the formation of Braille were synthesized and the optimal implementation of the processes of Braille formation was determined based on the methods of mathematical modeling of hierarchies, ranking and linear collapse of criteria, as a result of which a structured information database was obtained;

- a structural and functional model of information technology for assessing the priority factors of influence and processes on the quality of Braille formation on 3D models used by blind people was developed;

- three-dimensional models with Braille text were generated based on default parameters or values set by the user, image conversion into a three-dimensional model with further development of this functionality, as well as assessment of compliance with Braille dot size standards, and predictive assessment of the quality of the three-dimensional model taking into account the text, type of 3D printing and other parameters;

improved:

- the process of determining priority factors influencing the quality of Braille font formation and establishing recommendations for the use of 3D printing technology and three-dimensional modeling;

further developed:

- the concept of forming and substantiating priority factors influencing the quality of Braille font formation, as well as the use of modern information technologies in additive manufacturing processes and improving the functionality of software for three-dimensional modeling of Braille models, the use of artificial intelligence with established recommendations for integrating artificial intelligence to improve the quality of creating Braille tactile models, assessing the quality and recognizing three-dimensional objects using computer vision and neural networks.

The results of the dissertation work and scientific research were used within the framework of scientific research work, as well as in lecture courses and practical classes for students of the Ukrainian Academy of Printing, including conducting experimental

research and tested in the conditions of the «Levenya» training and rehabilitation center. Implementation data is confirmed by relevant documents.

Keywords: priority, semantic network, multi-level model, reachability matrix, predicate logic language, software, fuzzy sets, neural network, Braille, tactile perception, machine learning, computer vision, fuzzy logic, 3D printing and 3D modeling, additive technologies..

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових виданнях, включених до наукометричної бази Scopus:

1. Tymchenko O., Khamula O., Vasiuta S., Tarasov N., Sosnovska O. Identification of Factors Influencing the Design Processes in Startups. *Proceedings of the 4rd International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security*. Khmelnytsky, Ukraine. March 23–24, 2023. CEUR Workshop Proceedings, P. 271–281. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85154064361&origin=recordpage>.

2. Tarasov N., Khamula O. Factors influencing the creation of Braille 3d models in additive manufacturing. *1-st International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems (ICyberPhyS-2024)*. Khmelnytskyi, Ukraine, June 28, 2024. CEUR Workshop Proceedings. P. 129–141. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85200694226&origin=recordpage>.

Статті в іноземних закордонних виданнях

3. Tarasov N., Khamula O. Integrating artificial intelligence into additive manufacturing for the development of braille models. VI International Scientific and Practical Conference «scientific trends and trends in the context of globalization». April 19–20. Umeå, Sweden, 2024. Vol. 44, №. 197. P. 528–535. URL: <https://doi:10.51582/interconf.19-20.04.2024.053>.

4. Tarasov N., Khamula O., Prospects for integrating AI into inclusion for people with visual impairments. *VIII International Scientific and Practical Conference «International scientific discussion: problems, tasks and prospects»*. May, 19–20. Brighton, United Kingdom, 2024. Vol. 45, № 201. P. 580–588. URL: <https://doi:10.51582/interconf.19-20.2024.059>.

5. Tarasov. N., Khamula O. Predictive mathematical modeling to enhance additive manufacturing processes. *VI International scientific and practical conference*

«Grundlagen der modernen wissenschaftlichen forschung». Mai, 2024. Zürich–Vinnytsia: Boleswa Publishers & Ukrlogos Group LLC, 2024. P. 199–206. URL: <https://doi:10.36074/logos-24.05.2024.046>.

6. Tarasov N., Khamula O. Integrating artificial intelligence into 3d modeling software for optimized additive manufacturing. *VII International scientific and practical conference «Globalization of scientific knowledge: international cooperation and integration of sciences»* (10.05.2024; Vinnytsia, Ukraine – Vienna, Austria). № 39. P. 348–352. URL: [https:// doi:10.36074/grall-of-science.10.05.2024.052](https://doi:10.36074/grall-of-science.10.05.2024.052).

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних (Index Copernicus)

7. Tarasov N.A., Khamula O.G. Influence of additive technologies and selection of materials on the quality of 3D printed braille models. *Поліграфія і видавнича справа*. 2023. Vol. 2, № 86. P. 135–142. URL: <https://doi:10.32403/0554-4866-2023-2-86-135-142>.

8. Tarasov N.A., Khamula O.G. Optimizing 3D printing parameters and additive manufacturing techniques for braille production: a comparative analysis. *Наукові записки УАД*. 2023. Vol. 2, №. 67. P. 187–196. URL: <https://doi:10.32403/1998-6912-2023-2-67-187-196>.

9. Tarasov N., Khamula O., Soroka N. Analysis of 3d-printing technologies and their impact on additive manufacturing processes. *Наукові записки УАД*. 2024. Vol. 1, №. 68. P. 198–206. URL: <https://doi:10.32403/1998-6912-2024-1-68-198-206>.

10. Tarasov N., Khamula O., Soroka N. Analysis of 3d modeling software in additive manufacturing for creating braille models. *Комп'ютерні технології друкарства*. 2024. Vol. 1, №. 51. P. 8-18. URL: <https://doi:10.32403/2411-9210-2024-1-51-8-18>.

11. Tarasov N., Khamula O., Soroka N. Analysis of factors of 3d printers for the creation of 3d models of braille. *Поліграфія та видавнича справа*. 2024. Vol. 1, № 87. P. 115-124. URL: <https://doi:10.32403/0554-4866-2024-1-87-115-124>

Статті у фахових наукових виданнях України:

12. Tarasov N., Khamula O. Quality control of 3d braille models in additive manufacturing using artificial intelligence technology. *Квалілогія книги*. 2024. № 1 (45). С. 58–66.

Тези доповідей

13. Тарасов Н.А., Хамула О.Г. Порівняльний аналіз інформаційних технологій 3D-моделювання. *Тези доповідей наук.-техн конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* (Львів, 7–11 лютого 2022 року). Львів: УАД. 2022. С. 70.

14. Тарасов Н. А., Хамула О. Г., Васюта С. П. Інформаційні технології 3d моделювання. *VII Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (PMW-2022)* (Харків, 17–21 травня 2022 року). Харків: ХНУРЕ, 2022. Т. I. С. 115.

15. Тарасов Н. А., Хамула О. Г. Аналіз використання адитивних технологій. *Тези доповідей наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* (Львів, 6–10 лютого 2023 р.). Львів: УАД, 2023. С.70.

16. Тарасов Н. А., Хамула О. Г. Аналіз матеріалів для 3d-друку. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: тези доп. VIII Міжнар. наук.-техн. конф.* (Харків, 16–20 травня 2023 року). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2023. Т. 1. С. 56–57.

17. Tarasov N.A., Khamula O.G. Using of artificial intelligence in 3d printing technologies. *VI International scientific and practical conference «Modern research in science and education»* (8–10 February, 2024). Chicago, USA. P. 125–130.

18. Тарасов Н. А., Хамула О. Г. Технології адитивного виробництва в інклюзії (для людей з вадами зору). *Тези доповідей наук.-техн конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* (Львів, 5–9 лютого 2024 року). Львів: УАД, 2024. С. 209.

19. Tarasov N., Khamula O. Prospects for the development of additive manufacturing. *IX Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (PMW-2024)* (Харків, 14–17 травня 2024 року). Харків: ХНУРЕ, 2024. Т. I. С. 30–33.

Зміст

ВСТУП.....	25
 РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ДРУКУ ШРИФТОМ БРАЙЛЯ	1
1.1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ: ТЕНДЕНЦІЇ ТА ЗАСТОСУВАННЯ.....	35
1.2. Адитивні технології. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТА ЗАСТОСУВАННЯ	42
1.3 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ КРИТЕРІЇВ, ЗА ЯКИМИ ВИЗНАЧАЮТЬ НЕЗРЯЧІСТЬ	45
1.4. АНАЛІЗ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ. ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В 3D-МОДЕЛЮВАННІ ТА В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ	48
Висновки до розділу 1	52
 РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМУВАННЯ ШРИФТУ БРАЙЛЯ НА ОСНОВІ 3D- МОДЕЛЮВАННЯ	54
2.1. АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ШРИФТУ БРАЙЛЯ	54
2.2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ І ЇХ ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ФОРМУВАННЯ ШРИФТУ БРАЙЛЯ	61
2.3 Дослідження процесів роботи 3D-ПРИНТЕРІВ. ФАКТОРИ ВПЛИВУ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРІОРИТЕТНИХ МЕХАНІЗМІВ.....	78
2.4 Вплив матеріалів для 3D-друку на формування шрифту Брайля для якісного тактильного сприйняття	88
2.5. Переваги та недоліки інформаційних систем при формуванні тактильного шрифту	100

Висновки до розділу 2	104
-----------------------------	-----

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ШРИФТУ БРАЙЛЯ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ.....106

3.1. Концепція дослідження процесу формування шрифту Брайля та процесів адитивного виробництва	106
3.2. Формалізація зв'язків між факторами впливу на процес створення моделей із шрифтом Брайля в адитивному виробництві	111
3.3. Багаторівнева модель факторів впливу, враховуючи точність відтворення рельєсно-крапкового шрифту процесах 3D-друку	119
3.4. Моделі факторів впливу на формування шрифту Брайля в адитивному виробництві із застосуванням ранжування та визначення вагомості предикатів на основі нечіткої логіки.	126
3.5. Оптимізація моделі процесів формування шрифту Брайля та створення 3D-моделей.....	134
3.6. Аналітичний прогноз та варіанти формування шрифту Брайля на 3D-моделях в адитивному виробництві на основі методів лінійного згортання	148
Висновки до розділу 3	153

РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛЕЙ З ТЕКСТОМ БРАЙЛЯ, НА ОСНОВІ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ155

4.1. Алгоритми та методи оцінювання якості 3D-моделей із рельєсно-крапковим шрифтом Брайля	156
4.2. Функції термів і їхні значення в процесі формування тактильних моделей в адитивному виробництві.....	162

4.2.1 ПАРАМЕТРИ СЛАЙСЕРА(Q ₁):	165
4.3. РОЗРАХУНОК ВАГОВИХ ЗНАЧЕНЬ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ З НЕЧІТКОЮ БАЗОЮ ЗНАНЬ ТА НЕЧІТКИХ ЛОГІЧНИХ РІВНЯНЬ	175
4.4. ПРОГНОСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЯКОСТІ МОДЕЛЕЙ ІЗ РЕЛЬЄФНО-КРАПКОВИМ ШРИФТОМ	180
4.5. 3D-ДРУК ТА РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ПРОТОТИПІВ ІЗ ШРИФТОМ БРАЙЛЯ НА РІЗНИХ МАТЕРІАЛАХ	189
4.6. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ШРИФТУ БРАЙЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТА 3D-ДРУКУ	202
Висновки до розділу 4	206

РОЗДІЛ 5. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ШРИФТУ БРАЙЛЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ.....209

5.1. АЛГОРИТМИ ТА ФУНКЦІЇ ПРОГРАМНОГО ДОДАТКА «3D BRAILLE CAD»	210
5.2. ПРИНЦИП РОБОТИ ГЕНЕРУВАННЯ ТЕКСТУ В ШРИФТ БРАЙЛЯ.....	213
5.3. ГЕНЕРУВАННЯ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ З РЕЛЬЄФНО-КРАПКОВИМ ШРИФТОМ...216	
5.4. ПРИНЦИП РОБОТИ СЕРВІСУ АНАЛІЗУ ТРИВИМІРНОЇ МОДЕЛІ З ТЕКСТОМ БРАЙЛЯ НА ВІДПОВІДНІСТЬ СТАНДАРТАМ	218
5.5. ПРИНЦИП РОБОТИ СЕРВІСУ «КАЛЬКУЛЯТОР ПРОГНОЗУВАННЯ» ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ МАЙБУТНЬОЇ 3D-МОДЕЛІ З ТЕКСТОМ БРАЙЛЯ	219
5.6. ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРАЦІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ПЗ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ШРИФТУ БРАЙЛЯ ТА 3D-МОДЕЛЮВАННЯ.....	222
Висновки до розділу 5	244
ВИСНОВКИ.....	246

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....249

ДОДАТКИ.....	258
ДОДАТОК А. ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА.....	259
ДОДАТОК Б. ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	263
ДОДАТОК В. РОЗРАХУНКИ ТА ФУНКЦІЇ ТЕРМІВ І ЇХ ЗНАЧЕНЬ В ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ ТАКТИЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ	264
1. ПАРАМЕТРИ СЛАЙСЕРА(Q_1):	273
2. ПАРАМЕТРИ 3D-ПРИНТЕРА(Q_2):.....	281
3. РОЗМІРИ КРАПОК ТЕКСТУ ШРИФТОМ БРАЙЛЯ (R_1).....	286
4. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ(R_2)	289
5. ПОСТДРУКАРСЬКІ ПРОЦЕСИ(R_3)	294
6. МАТЕРІАЛИ 3D-МОДЕЛІ(D_1).....	296
7. РОЗМІР КЛІТИНОК ТА СІТКИ БРАЙЛЯ (D_2) ТА ТИП ШРИФТУ(D_3)	303
ДОДАТОК Д. КОД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ «3D BRAILLE CAD».....	305
ДОДАТОК Е. ПРОГРАМНИЙ КОД ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ РЕЙТИНГУ ФАКТОРІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ELO.....	326
ДОДАТОК Ж. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	328

Вступ

Актуальність теми. Останнім часом зростає інтерес до покращення якості життя людей із вадами зору та незрячих. Більшість виробників створює 3D-моделі для звичайних користувачів, а кількість 3D-моделей, адаптованих для осіб з порушенням зору, які використовують шрифт Брайля, залишається недостатньою. Недостатня кількість адаптованих засобів для роботи з 3D-моделями у незрячих осіб створює бар'єри в інформаційному доступі. Це зумовлює активний розвиток 3D-моделювання на основі адитивних технологій. Проблема інклюзивної освіти та соціальної інтеграції людей з інвалідністю, зокрема з вадами зору і незрячих, потребує постійного вдосконалення методів подання інформації та створення доступного інклюзивного середовища. Водночас реалізація сучасних підходів до формування шрифту Брайля нерідко обмежується технічними та економічними чинниками. У цій дисертаційній роботі запропоновано комплексний підхід, що ґрунтується на використанні сучасних інформаційних технологій – методів 3D-моделювання, 3D-друку (адитивного виробництва) та інформаційних систем, зокрема систем штучного інтелекту, – для розроблення й удосконалення процесу формування шрифту Брайля. Адитивне виробництво – це складна і наукомістка галузь. Компанії, які спеціалізуються на 3D-друці, у середньому витрачають майже 20% від своїх доходів на дослідження і розроблення. Отже, технології адитивного виробництва та 3D-моделювання дають змогу створювати складні моделі й прототипи, є рушієм інновацій у сфері виробництва та становлять один з актуальних напрямів розвитку інформаційних технологій. Їх застосування важливе для підвищення якості відтворення об'єктів і впровадження сучасних методів виробництва, необхідних для забезпечення потреб незрячих людей, які користуються тактильними об'єктами і зчитують інформацію за допомогою шрифту Брайля. Для цього потрібні цілеспрямовані дослідження, спрямовані на

покращення сприйняття інформації та створення інклюзивного середовища.

Актуальність дослідження зумовлена кількома чинниками. По-перше, цифрова трансформація суспільства створила передумови для впровадження передових технологій у сферу освіти та соціальної адаптації. По-друге, розвиток технологій 3D-моделювання та 3D-друку відкриває нові можливості для створення високоточних тактильних моделей, здатних задовольнити потреби незрячих осіб у якісній та різноманітній літературі, у навчальних матеріалах й інформаційних ресурсах. По-третє, інтеграція зазначених технологій у процес формування шрифту Брайля сприяє не лише підвищенню ефективності виробництва виготовлення тактильних матеріалів, а й розробленню інноваційних освітніх рішень, що позитивно впливає на якість життя людей із порушеннями зору.

Ця дослідницька робота спрямована на інтеграцію методів інформаційних технологій, 3D-моделювання та 3D-друку для розв'язання проблеми формування шрифту Брайля. Запропонований міждисциплінарний підхід дає змогу не тільки оптимізувати процес створення тактильних продуктів, а й суттєво розширити можливості їх використання в освітній і реабілітаційній практиці.

Практична значущість дослідження полягає в можливості впровадження розроблених методик у діяльність спеціалізованих установ, що опікуються освітою та підтримкою незрячих осіб, а також у промислове виробництво тактильних видань й інформаційних матеріалів. Отримані результати можуть сприяти підвищенню якості та доступності освіти, соціальній інтеграції людей із порушеннями зору й стимулювати подальший розвиток технологій, орієнтованих на формування інклюзивного суспільства.

Таким чином, проведене дослідження спрямоване на розв'язання актуальної проблеми підвищення якості тактильних інформаційних матеріалів для незрячих осіб шляхом застосування сучасних інформаційних технологій. Інтеграція методів 3D-моделювання та 3D-друку у процес формування шрифту Брайля є інноваційним підходом, здатним суттєво розширити можливості інклюзивної освіти та соціальної

підтримки осіб із порушеннями зору. Крім того, результати цього дослідження можуть зробити вагомий внесок у розвиток міждисциплінарних наукових розвідок на перетині інформаційних технологій, інженерії та педагогіки

Вивченню окремих аспектів адитивних технологій, зокрема впливу 3D-друку, шрифту Брайля, особливостей тактильного сприйняття, а також їхнього значення для розвитку промисловості, інновацій і сфери інтелектуальної власності, присвячено низку публікацій як українських, так і зарубіжних учених. Ці питання досліджували С. Бехтольд, А. Гурко, К. Джуелл, Б. Депортер, Д. Мендіс, Д. Колесніков, В. Смірнов, С. Толкачев, Б. Токарев. Серед вітчизняних науковців варто відзначити праці Г. Андрощука, А. Гречка, Д. Дубова, О. Кронди, С. Чернишова, О. Штефан, В. Маїка, Р. Зацерковної, М. Гавенка, та інших. Багатогранність і міждисциплінарний характер проблематики адитивного виробництва зумовлюють необхідність подальших науково-технічних досліджень, а також впровадження нових стандартів і нормативів для розроблення відповідних продуктів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота узгоджується з пріоритетними напрямками розвитку науки й техніки та відповідає чинному законодавству України, зокрема: Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (№ 2623-III від 11 липня 2001 р.), Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» (№ 433-IV від 16 січня 2003 р.), Закону України «Про національну програму інформатизації» (№ 74/98- ВР від 4 лютого 1998 р.), Закону України «Про основи соціальної захищеності осіб з інвалідністю в Україні» (№875-XII від 21 березня 1991 р.), Конвенції про права осіб з інвалідністю (ратифіковано Законом України № 1767-VI від 16 грудня 2009 р.), Розпорядженню Кабінету Міністрів України «Про схвалення Національної стратегії із створення безбар'єрного простору в Україні на період до 2030 року», напрям 2: «Інформаційна безбар'єрність» (№ 366-р від 14 квітня 2021 р.), пріоритетним тематичним напрямом наукових досліджень

Національного університету «Львівська політехніка».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення інформаційної технології забезпечення якості тактильного сприйняття зображень під час формування шрифту Брайля із застосуванням 3D-моделювання на основі дослідження факторів впливу та моделей сприйняття його параметрів.

Метою дослідження в дисертації є розв'язання таких завдань:

- здійснити аналіз та детальний опис рекомендацій і технологій, які застосовують для формування шрифту Брайля в умовах адитивного виробництва та в 3D-моделювання;
- виокремити фактори, які впливають на якість формування шрифту Брайля в процесах адитивного виробництва, а також ефективність тактильного зчитування інформації з моделей (зокрема характеристики шрифту Брайля, такі як висота крапки і т.п.);
- розробити концепцію дослідження процесу формування шрифту Брайля засобами адитивного виробництва.
- здійснити формалізоване відображення взаємозв'язків між факторами формування шрифту Брайля, створенням тривимірної цифрової моделі та процесами адитивного виробництва;
- розробити моделі залежностей між факторами, що впливають на якість формування шрифту Брайля із застосуванням широкого спектра методів, а також визначити оптимальні підходи до формування шрифту Брайля в умовах адитивного виробництва;
- розробити структурно-функціональну модель інформаційної технології підвищення якості формування шрифту Брайля в адитивному виробництві / умовах адитивного виробництва;
- реалізувати програмний продукт для формування шрифту Брайля, що забезпечує 3D-моделювання, аналіз і прогнозування якості в процесах адитивного виробництва.

Об’єктом дослідження є процес формування шрифту Брайля з використанням 3D-моделювання та технологій адитивного виробництва на основі програмного забезпечення для 3D-моделювання і друку прототипів на 3D-принтерах.

Предметом дослідження є моделі, методи, технології, фактори впливу та засоби, що забезпечують процес формування шрифту Брайля для підвищення якості тактильного сприйняття.

Методами дослідження є засоби теорії мереж та елементи логіки предикатів, застосовані для формального моделювання відношень між факторами у процесах формування шрифту Брайля. Для визначення пріоритетності факторів, що впливають на якість формування шрифту Брайля, використано методи математичного моделювання ієрархій; для синтезу удосконаленої багаторівневої моделі – методи ранжування та оцінювання вагомості предикатів. На основі методу лінійного згортання сформовано та розраховано альтернативні варіанти реалізації пріоритетних факторів у формуванні шрифту Брайля. Використано структурно-функціональну модель інформаційної технології для визначення якості реалізації цих факторів і параметрів технологій 3D-друку для формування шрифту Брайля. У межах дослідження розроблено програмне забезпечення для створення стандартної 3D-моделі, генерації шрифту Брайля та аналізу відповідності 3D-моделі встановленим стандартам.

Для прогнозування якості майбутньої 3D-моделі з шрифтом Брайля використано мову програмування Golang (без UI-інтерфейсу із застосуванням консольних команд). Окрім того, проведено аналіз можливостей інтеграції штучного інтелекту для створення 3D-моделей і оцінювання їхньої якості.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі розв’язано низку науково-прикладних завдань, пов’язаних із розробленням та дослідженням інформаційної технології формування шрифту Брайля на основі 3D-моделювання, що забезпечує якість тактильного сприйняття елементів шрифту

незрячими особами та може бути використана в інклюзивній освіті. На основі теоретичних й експериментальних досліджень отримано такі результати: *уперше:*

- формалізовано зв'язки між факторами, що впливають на якість формування шрифту Брайля в процесах адитивного виробництва, та параметрами якості цього формування на основі семантичних мереж і мови логіки предикатів, що забезпечило теоретичне підґрунтя подальших досліджень;
- синтезовано багаторівневі моделі пріоритетності впливу виокремлених факторів і процесів, які впливають на формування шрифту Брайля, та визначено оптимальний варіант реалізації відповідних процесів на основі методів математичного моделювання ієрархій, ранжування й лінійного згортання критеріїв, у результаті чого сформовано структуровану інформаційну базу даних;
- розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології для оцінювання пріоритетних факторів впливу та процесів, що визначають якість формування шрифту Брайля на 3D-моделях, які використовують незрячі особи;
- виконано генерування тривимірних моделей із текстом Брайля на основі параметрів за замовчуванням або встановлених користувачем значень; здійснено конвертацію зображення у тривимірні моделі з подальшим розвитком цього функціоналу; проведено оцінку відповідності розмірів крапок шрифту Брайля стандартам, а також прогностичне оцінювання якості тривимірної моделі з урахуванням тексту, типу 3D-друку та інших параметрів;

удосконалено:

- процес визначення пріоритетних факторів впливу на якість формування шрифту Брайля та розроблено рекомендації щодо застосування технології 3D-друку та тривимірного моделювання;

отримало подальший розвиток:

- концепція формування та обґрунтування пріоритетних факторів, що впливають на якість формування шрифту Брайля; використання сучасних інформаційних технологій в адитивному виробництві; покращення функціоналу програмного забезпечення для тривимірного моделювання брайлівських моделей; застосування штучного інтелекту з рекомендаціями щодо його інтеграції для підвищення якості створення тактильних брайлівських моделей; оцінювання якості й розпізнавання тривимірних об'єктів за допомогою комп'ютерного зору та нейронних мереж.

Практичне значення одержаних результатів. У дисертаційній роботі здобуто результати, що мають важливе практичне значення:

- описано основні принципи роботи технологій, які використовують для створення тактильних 3D-моделей, обґрунтовано переваги застосування 3D-друку, а також подано рекомендації та вимоги щодо формування шрифту Брайля;
- обґрунтовано рекомендації щодо формування шрифту Брайля, які охоплюють комплекс факторів і процесів, що впливають на якість тактильної моделі;
- розроблено інформаційну концепцію дослідження процесів і факторів формування шрифту Брайля;
- здійснено формалізоване відображення відношень між факторами, що впливають на формування шрифту Брайля;
- розроблено моделі впливу факторів на якість формування шрифту Брайля із застосуванням широкого спектра методів; визначено оптимальні параметри його формування;
- створено структурно-функціональну модель інформаційної технології покращення якості процесів формування шрифту Брайля;
- запропоновано програмний продукт для перетворення брайлівської 3D-моделі, а також для аналізу стандартним розмірам і прогнозування якості

майбутньої 3D-моделі.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес Інституту поліграфії та медійних технологій НУ «Львівська політехніка» під час лекційних і лабораторних занять. Наявні підтверджувальні документи щодо впровадження.

Особистий внесок здобувача: формулювання наукових завдань та проведення досліджень з визначення факторів, які впливають на якість формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання, а саме в процесах адитивного виробництва і тактильного сприйняття моделей незрячими особами. Також виявлення та побудова математичних моделей факторів впливу й пріоритетних процесів, що визначають якість формування шрифту Брайля в тактильних моделях. Розроблення та реалізація програмного забезпечення для створення тактильних моделей, оцінювання 3D-моделей зі шрифтом Брайля на відповідність міжнародним стандартам, прогнозування якості майбутніх 3D-моделей з урахуванням різних технологій 3D-друку, а також інтеграція штучного інтелекту для підвищення якості створення інклюзивного середовища у процесі формування тактильних моделей.

У спільних публікаціях внесок здобувача такий:

[1] – проведено аналіз факторів, які впливають на проєктування процесів у різних компаніях, зокрема у стартапах у сфері адитивних технологій виробництва та 3D-моделювання; [2] – здійснено аналіз факторів, які впливають на формування шрифту Брайля в процесах адитивного виробництва, визначено найбільш пріоритетні з них, виконано відповідні розрахунки, проведено експериментальні дослідження для виявлення впливових чинників та аналізу технологічних процесів 3D-друку; [3] – здійснено аналіз можливостей інтегрування інтеграції штучного інтелекту на різних етапах виробничих процесів з метою покращення якості виготовлення брайлівських моделей у межах застосування 3D-технологій; [4] – проведено дослідження перспектив використання штучного інтелекту в інклюзивному середовищі для підтримки незрячих людей осіб; [5] – проведено

огляд застосування прогностичного оцінювання та виявлено переваги використання прогностичного математичного моделювання в адитивному виробництві; [6] – проаналізовано поточний стан програмного забезпечення для 3D-моделювання, що застосовується для адитивного виробництва (3D-друку), а також розглянуто можливості використання штучного інтелекту для оптимізації цих процесів, оцінено наслідки та визначено перспективні напрями інтеграції штучного інтелекту у сферу 3D-моделювання для підвищення ефективності адитивного виробництва; [7] –здійснено аналіз ключових факторів, що впливають на вибір технології адитивного виробництва та на добір матеріалів для 3D-друку; [8] – виконано порівняльний аналіз та дослідження оптимальних параметрів 3D-друку (адитивного виробництва), 3D-моделі з шрифтом Брайля на 3D-принтері типу FDM-FFF, SLA-DLP, SLS; [9] – здійснено аналіз факторів впливу в процесах 3D-друку та визначено їхній вплив на адитивне виробництво; [10] –проведено порівняльний аналіз програмного забезпечення для 3D-моделювання, яке застосовується в адитивному виробництві (для створення твердотільних моделей), з акцентом на формування тактильних 3D-моделей зі шрифтом Брайля; [11] – досліджено та виявлено фактори впливу 3D-принтерів на якість створення тактильних моделей із шрифтом Брайля; [12, 17] – здійснено дослідження та інтеграції штучного інтелекту в процеси адитивного виробництва для контролю якості тактильних 3D-моделей зі шрифтом Брайля, а також у процеси 3D-друку; [19] – здійснено аналіз та оцінювання перспектив активного розвитку й застосування адитивного виробництва; [13, 14] – проведено порівняльний аналіз інформаційних технологій 3D-моделювання; [15, 16, 19] – проаналізовано матеріали для 3D-друку та можливості використання адитивних технологій для створення різних моделей, зокрема й для осіб із порушеннями зору для підвищення якості інклюзивного середовища.

Апробація результатів дисертації: основні результати дисертації доповідались та обговорювались на: звітних науково-технічних конференціях

професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів Української академії друкарства (Львів, 2021–2024); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Поліграфічні, мультимедійні та WEB-технології» (Харків, 2022, 2023, 2024); 1st International Workshop on Intelligent&CyberPhysical Systems (ICyberPhyS-2024), CEUR WorkshopProceedings (Хмельницький, 2024).

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 19 наукових праць, серед яких: 2 статті у виданнях, що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus або WebofScience; 6 статей у наукових фахових виданнях України, затверджених МОН України; 4 публікації в закордонних виданнях; 7 публікацій у збірниках наукових конференцій.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (106 найменувань) та 6 додатків. Загальний обсяг роботи 333 сторінки, з яких основна частина займає 224 сторінки. У дисертації представлено 61 рисунок та 52 таблиці.

Розділ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ДРУКУ ШРИФТОМ БРАЙЛЯ

1.1. Аналіз інформаційних технологій 3D-моделювання: тенденції та застосування

3D-моделі представляють певне фізичне тіло за допомогою множини крапок у 3D-просторі, які з'єднані різними геометричними об'єктами, такими як вигнуті лінії та поверхні, лінії трикутники тощо [1, 105]. Як сукупність певних даних, 3D-моделі можна створювати: вручну; процедурним моделюванням, тобто алгоритмічно, а також шляхом сканування [2, 3]. Такі поверхні визначають, використовуючи відображення текстур [4].

У комп'ютерній 3D-графіці (3D-моделюванні) – це процес створення математичного представлення будь-якої поверхні об'єкта (живого або неживого) у трьох вимірах на основі координат за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення шляхом маніпулювання [5, 6].

Також є можливість відтворити 3D-модель як двовимірне зображення за допомогою процесу 3D-рендерингу або застосовувати в комп'ютерному моделюванні фізичні явища (3D-сканування) [7].

У сфері 3D-моделювання кілька різних методів, кожен з яких адаптований до різних кінцевих цілей і класифікується за технологіями та критеріями. Виділяють три основні методи представлення 3D-моделі:

Цифрова ліпнина

Цифрова ліпнина (Digital Sculpting) – це техніка створення високодеталізованих 3D-моделей, що імітує процес ліплення з глини [8].

Для цього методу використовують таке програмне забезпечення, як ZBrush, Blender (з інструментом Sculpting) та Autodesk Mudbox. Основні функції цього методу включають пензлі для згладжування, заточування, надання об'єму та деталізації дрібних елементів. Основне застосування створення органічних

моделей (персонажів, тварин, рослин), розроблення складних декоративних елементів, таких як барельєфи, текстури та орнаменти, а також візуалізація художніх й архітектурних об'єктів [9].

Щодо створення тактильних моделей, цей метод має низку переваг і недоліків. Серед переваг – можливість ручного моделювання тактильних елементів, включно з опуклістю шрифту Брайля. Крім того, він забезпечує зручні інструменти для створення складних рельєфів, таких як карти, що поєднуються зі шрифтом, а також підтримує високу деталізацію елементів, важливу для точності тактильного сприйняття. Недоліками є більш трудомісткий процес створення регулярних стандартних елементів (наприклад, ідеально круглих крапок Брайля) та значні вимоги до обчислювальних ресурсів при роботі з моделями високої деталізації.

Полігональне моделювання

Полігональне моделювання (Polygonal Modeling) – це метод створення 3D-моделей з використанням багатокутників, найчастіше трикутників і чотирикутників (квадів). Цей процес складається з кількох етапів, а саме: 1) створення базової сітки (low-poly); 2) додавання деталей шляхом згладжування (subdivision surface); 3) оптимізація сітки для ігор чи анімації [10]. Програмне забезпечення – це Blender, 3ds Max, Maya, Cinema 4D, а також використання алгоритмів автоматичної ретопології (Quad Remesher). Застосування цього методу охоплює створення 3D-моделей для ігор, фільмів, анімації, а також прототипів у машинобудуванні та промисловості. Основні переваги для створення брайлівських моделей такі: високий контроль над формою та точністю кожного елемента; можливість точної роботи із сіткою, що дозволяє створювати сферичні точки шрифту Брайля з рівномірною висотою та діаметром; простота інтеграції елементів Брайля з базовою геометрією (наприклад, табличкою або корпусом пристрою).

Серед основних недоліків методу – менша зручність для моделюванні складних форм (прототипів або карт із різноманітним рельєфом), а також

необхідність значного обсягу ручної роботи під час створення складного тексту шрифтом Брайля чи дрібних деталей.

Застосування полігонального методу може бути доцільним для моделювання стандартних об'єктів із точковим рельєфом шрифту Брайля, а також для створення табличок та покажчиків, де важлива точність геометрії та стандартизовані розміри дотримання стандартизованих розмірів [11].

Моделювання кривих

Моделювання кривих ґрунтується на використанні сплайнів або кривих Безьє для створення складних поверхонь із високою точністю. Це особливо важливо для проєктів із високим ступенем деталізації. Головним програмним забезпеченням цього методу є NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) – математична модель для опису плавних кривих та поверхонь, а також програми Rhino 3D, SolidWorks, AutoCAD, Fusion 360 [11]. Перевагами використання моделювання кривих є висока точність геометрії, що насамперед важливо для тексту зі шрифтом Брайля, де розміри крапок є стандартизованими, а також легкість створення плавних поверхонь і складних форм. Додатковою перевагою є можливість автоматизації: крапки Брайля можна розміщувати за заданими кривими або матрицею. До недоліків належать потреба у розумінні математичних основ моделювання кривих, а також необхідність додаткової деталізації при створенні складних текстур або дрібних елементів. Застосуванням цього методу є моделювання тактильних поверхонь із плавними переходами (наприклад, географічних моделей з опуклими елементами) і розміщення крапок Брайля на нестандартних поверхнях (вигнуті таблички, циліндри тощо).

Деякі виробники програмного забезпечення реалізують свої 3D та 2D-програми як окремі пакети, але багато хто об'єднує їх в один комплекс. Залежно від програмного забезпечення та апаратних характеристик комп'ютера 3D-моделі можуть створюватися за допомогою різних методів, зокрема алгоритмічного моделювання, комп'ютерного малювання від руки або 3D-сканування. Такі моделі

можна класифікувати на три основні типи залежно від точок даних, що використовуються для їх створення:

Каркасна модель (рис. 1.1.1) створюється з ліній і точок (вершин), які формують каркас об'єкта. Особливістю цього виду моделювання є використання лише ліній і ребер для представлення структури без відображення поверхні чи об'єму; візуально така модель нагадує лінійний каркас об'єкта. Цей вид моделювання доцільно використовувати для чорнового опрацювання форми або виконання попередніх розрахунків [12]. У застосуванні до моделей із текстом Брайля будуть представлені як сітка з вершин і ліній. Недоліком такого підходу є неможливість друку моделі на 3D-принтері, оскільки вона не має поверхні та об'єму. Однак він може бути корисним для візуалізації та попереднього планування розташування елементів.

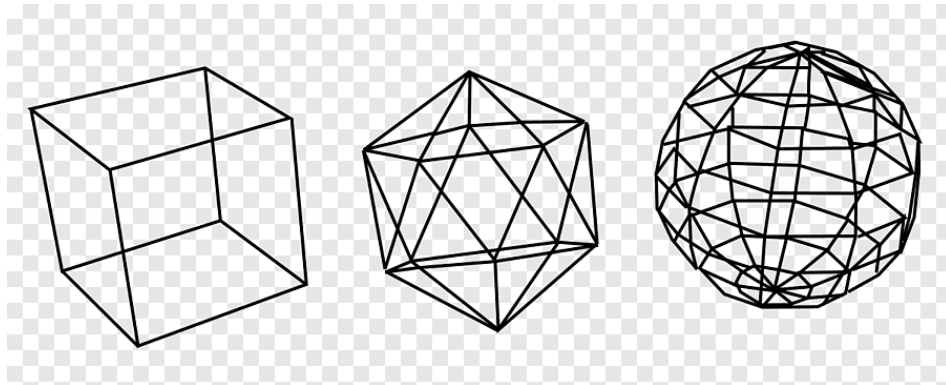


Рис. 1.1.1 Каркасна модель

- **Поверхневі моделі** (рис. 1.1.2) ґрунтуються лише на описі зовнішньої поверхні об'єкта без урахування внутрішнього об'єму. Поверхня описується за допомогою полігонів (найчастіше трикутників) або кривих. Особливістю цього типу моделювання є можливість точно передати зовнішню форму об'єкта. Недоліком є відсутність інформації про внутрішній об'єм, тому модель є порожньою [13]. Такий тип моделювання застосовують переважно для створення складних візуально реалістичних об'єктів. У випадку тривимірних моделей із текстом Брайля символи (крапки) можуть бути

змодельовані як окремі опуклості (raised крапки) на поверхні. Така модель підходить для візуалізації, але для 3D-друку потребує додаткової обробки (замкнути об'єм). Водночас вона може бути корисною, якщо модель створена для візуального представлення, наприклад, рендерингу.

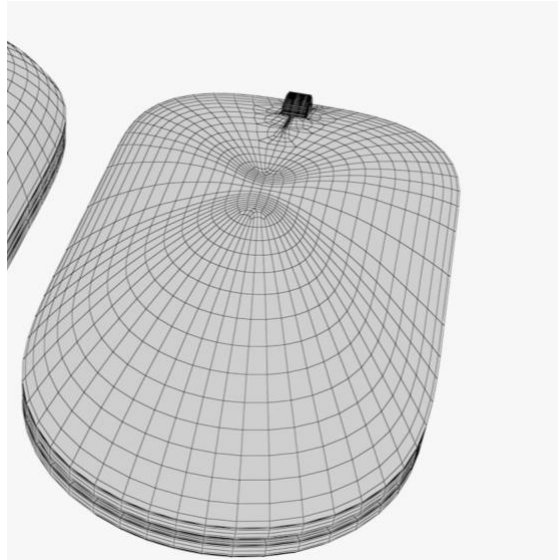


Рис. 1.1.2 Поверхнева модель

- **Тверді 3D-моделі** (рис. 1.1.3) описуються як об'єкти з реальним об'ємом замкнутою поверхнею. Такий підхід дозволяє моделі мати об'єм, масу та фізичні властивості. Об'єкт цього типу можна друкувати на 3D-принтері без доопрацювання. Ключова перевага такого моделювання полягає в його універсальності для інженерних і виробничих завдань [14]. Цей підхід найчастіше застосовують для створення тактильних брайлівських моделей, оскільки символи (крапки) тексту Брайля можуть бути змодельовані як опуклості чи окремі тверді об'єкти, інтегровані в основну модель. Завдяки точному відтворенню рельєфу й готовності до 3D-друку, цей вид моделювання є оптимальним для цілей нашого дослідження.

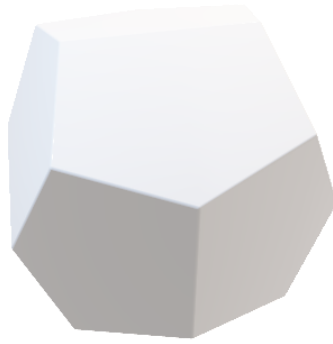


Рис. 1.1.3 Тверда модель

Моделювання можна виконувати за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення такого як *Blender*, *Cinema 4D*, *LightWave*, *Maya*, *Modo*, *3ds Max*) або за допомогою компонентів програм (наприклад, *Shaper*, *Lofter* у *3ds Max*, також для створення сцен іноді використовують мови опису, як-от у *POV-Ray*. У деяких випадках чіткого розмежування між фазами моделювання немає; моделювання стає частиною загального процесу побудови сцени (наприклад, *Caligari trueSpace* і *Realsoft 3D*). Крім того, 3D-моделі можна створювати за допомогою фотограмметрії, застосовувавши такі програми, як *RealityCapture*, *Metashape* і *3DF Zephyr*. Очищення моделей і подальшу обробку можна виконати за допомогою таких програм, як *MeshLab*, *GigaMesh Software Framework*, *netfabb* або *MeshMixer*. Фотограмметрія створює 3D-моделі за допомогою алгоритмів для інтерпретації форми та текстури реальних об'єктів і середовищ на основі фотографій, зроблених під різними кутами об'єкта. Складні матеріали, як от пісок, хмари чи бризки рідини, моделюють за допомогою систем частинок і представляють множину 3D-координат, яким можуть відповідати точки, полігони, текстуровані елементи або спрайти [15, 16] .

Таблиця 1.1.1

Порівняння типів 3D-моделювання з 2D-методами

ФАКТОР	Твердотільне	Каркасне	Поверхнєве	2D
Тактильна доступність	Повноцінний рельєфний текст	Обмежено виглядом	Гладка рельєфна поверхня	Відсутня
Міцність	Висока	Низька	Середня	Відсутня
Гнучкість дизайну	Висока	Середня	Дуже висока	Низька
Складність поверхні	Підтримується	Концептуально	Ідеальне	Неможливо
Використання матеріалу	Високе	Мінімальне	Середнє	—
Естетика	Універсальний дизайн	Чорновий варіант	Рельєфний поверхневий дизайн	Обмежений дизайн

Недоліки 3D-моделювання порівняно з 2D-методами можуть включати складність у засвоєнні програмного забезпечення та труднощі під час створення складних прототипів. Хоча програмне забезпечення високого класу, таке як Autodesk Inventor, Autodesk Fusion360 та ін., пропонує розширені функції твердотільного моделювання, необхідні для складних дизайнерських та інженерних проєктів [5], є і більш доступні варіанти. Tinkercad і FreeCAD, наприклад, забезпечують більш зручний інтерфейс, що дозволяє здійснювати швидке прототипування без потреби в додаткових знаннях. Таким чином, класифікація 3D-моделей на сферу застосування не тільки відображає складність використовуваних інструментів, таких як AutoCAD, SolidWorks, Blender, OpenSCAD, Autodesk Fusion 360, а й демонструє різноманіття завдань, які вони вирішують у різних галузях [17].

Оскільки технологія 3D-моделювання продовжує розвиватися, а вибір програмного забезпечення для моделювання стає дедалі ширшим, основні завдання моделювання часто можна виконати за допомогою безплатних інструментів, які задовольняють базові потреби візуалізації. З іншого боку, просунуте 3D-

моделювання, що потребує повного набору функцій для створення складних детально опрацьованих моделей, зазвичай потребує професійних програм. Таке професійне ПЗ має вирішальне значення для високорівневого 3D-моделювання проте його вартість може сягати кількох тисяч доларів на рік [17].

З огляду на процес проєктування, 3D-моделювання є одним з етапів тривалого процесу розроблення. Джерелом геометрії для створення форми об'єкта можуть бути [18, 19]:

- дизайнер, інженер або художник, який працює в системі 3D-CAD;
- об'єкт, перероблений або скопійований за допомогою тривимірного сканера;
- математичні дані, що зберігаються в пам'яті у вигляді числового опису або результатів розрахунків об'єкта.

Значну кількість 3D-програмного забезпечення також використовують для створення цифрових моделей механічних деталей ще до їх фактичного виготовлення. У таких випадках застосовують програмне забезпечення, пов'язане з CAD і CAM-технологіям, яке дає змогу не лише конструювати деталі, а й збирати з них цілісні моделі, візуалізувати їхню роботу та проводити функціональне моделювання й симуляцію [17–19].

1.2. Адитивні технології. Аналіз процесів та застосування

Технології адитивного виробництва, або 3D-друк, – це метод створення тривимірних об'єктів шляхом пошарового нанесення матеріалу або фотополімеризації. Ці технології пропонують низку методів, адаптованих до конкретних потреб різних галузей промисловості, зокрема аерокосмічної, інклюзивних технологій, медичної та навіть харчової промисловості [105]. В основі адитивного виробництва – принцип пошарового формування, що дає змогу виготовляти складні та індивідуальні деталі, які важко або навіть неможливо створити за допомогою традиційних методів виробництва. Серед технологій адитивного виробництва найбільш відомі FDM-FFF, SLA, PolyJet, SLS, DLP [20].

Основні технології адитивного виробництва:

1. Vat Photopolymerization (чанна фотополімеризація):

- SLA (Stereolithography) –технологія, яка використовує лазер для поетапного для затвердіння рідкого фотополімеру шар за шаром, створюючи тверду модель. Застосовують для виготовлення високоточних прототипів, брайлівських моделей, стоматологічних моделей, ювелірних виробів [21];
- DLP (Digital light processing) – для побудови об’єктів використовують рідкі фотополімерні смоли, які тверднуть під впливом світлових хвиль (кожен шар твердіє одразу). Цей метод схожий на SLA, однак має певні переваги: вищу швидкість друку та використання спеціального проєктора як джерела світла. Використовують для створення високодеталізованих об’єктів, прототипів із гладкою поверхнею [21].

2. Material Extrusion (екструзія матеріалу):

- FDM/FFF (Fusion Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication): розплавлений пластиковий матеріал екструдується через сопло та наноситься пошарово для створення об’єкта. Застосовують для створення прототипів, функціональних деталей, а також освітніх моделей [22].

3. Material Jetting (струминне подавання матеріалу)

- PolyJet – розпилення крапель рідкого фотополімеру на платформу з подальшим затвердінням ультрафіолетовим світлом. Метод дозволяє використовувати різні матеріали та кольори в одній моделі. Застосовують для створення високодеталізованих об’єктів, прототипів з еластичними компонентами, а також кольорових моделей [22].

4. Powder Bed Fusion (вибіркове лазерне спікання або плавлення в порошковому шарі):

- SLS (Selective Laser Sintering) – лазер сплавляє частинки порошкового

матеріалу (наприклад, нейлону) для формування кожного шару без потреби в структурах, що підтримують. Застосування: функціональні прототипи, деталі кінцевого використання, складні геометричні форми [23].

Кожна із цих технологій ґрунтується на спільному принципі моделювання вибіркового шару, проте відрізняється використовуваними матеріалами, рівнем точності та вимогами до застосування. Це підкреслює важливість розуміння фундаментальних принципів роботи кожної технології для вибору оптимального методу створення потрібного прототипу або моделі [20].

Адитивне виробництво включає такі базові етапи [24]: 1) ідея та проєктування – створення 3D-моделі з урахуванням специфіки матеріалів і технології друку; 2) прототипування – швидке виготовлення прототипів для тестування та коригування; 3) серійне виробництво – перехід до масштабного виготовлення на основі апробованих рішень; 4) контроль якості – перевірка готових виробів на відповідність технічним вимогам та стандартам.

Створення прототипу або тривимірної моделі за допомогою адитивного виробництва охоплює 4 етапи: 1) створення цифрової моделі за допомогою програм САД створюють 3D-модель об'єкта; 2) додрукарська підготовка – модель готують для друку: здійснюються слайсинг, визначаються підтримки та структури шарів; 3) 3D-друк – фізичне виготовлення об'єкта шляхом послідовного нанесення шарів матеріалу; 4) післядрукарські процеси – очищення, видалення підтримок, шліфування та інші процедури для досягнення остаточного вигляду та характеристик моделі [24].

Адитивне виробництво має низку особливостей, і, на відміну від традиційних видів виробництва, надає такі переваги: економічність – мінімальні відходи матеріалу порівняно з традиційними способами; можливість створення складних геометричних форм, які є недоступними для інших методів виробництва унікальних чи невеликих партій продуктів на замовлення зі зміною форми, розміру

та функціоналу без значного збільшення вартості. Завдяки локалізованому виробництву 3D-друку є змога виготовляти деталі на місці, знижуючи потребу в тривалих логістичних ланцюгах та зменшуючи час очікування. Традиційні методи виробництва вимагають створення форм, пресів чи матриць, що збільшує витрати на запуск проєкту, тоді як 3D-друк позбавляє від цих витрат. Щодо матеріалів, то 3D-принтери можуть використовувати широкий спектр: пластик, метал, кераміку, смоли, а також гібридні та композитні матеріали [25, 26].

1.3 Аналіз основних критеріїв, за якими визначають незрячість

Згідно з підрахунками Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) станом на 2020 рік, близько 2,2 мільярда людей у світі мають порушення зору, з них приблизно 36–39 мільйонів є незрячими. Частка людей із порушеннями зору становить 3,44% населення, з них 0,49% – незрячі, а 2,95% мають середнє або тяжке порушення зору (MSVI) [27]. За даними Американського фонду незрячих, понад 12 мільйонів американців віком від 40 років мають ті чи інші порушення зору: з них 1,3 мільйона – офіційно незрячі, 3 мільйони втратили зір після корекції і 8 мільйонів мають некориговані рефракційні порушення [28].

Є різні способи класифікації порушень зору залежно від причини, ступеня тяжкості та ураженої частини зорової системи. Критерії порушення зору під час роботи з комп'ютером, наприклад у рекомендаціях WWWC, базуються на трьох загальних класифікаціях порушень зору [29]:

- юридична сліпота – особу вважають юридично сліпою, якщо гострота зору становить 20/200 або менше на кращому коригуючими лінзами;
- глибокі порушення зору – визначають як гостроту зору в межах від 20/500 до 20/1000 на кращому оці з коригувальними лінзами;
- майже повна втрата зору, якщо гострота зору менша ніж 20/1000 на кращому оці навіть з коригувальними лінзами.

У нашому науковому дослідженні зосередимось на повному порушенні зору, коли людина втрачає здатність бачити світ та сприймає будь-яку інформацію за допомогою тактильних брайлівських моделей [29]. Для вирішення цієї проблеми необхідно ініціювати оптимізацію та згрупувати труднощі, з якими стикаються незрячі люди та люди з порушеннями зору під час читання інформації з тактильних моделей. Визначимо такі ключові критерії:

- тактильна чутливість: знижена чутливість, що може бути наслідком проблем зі здоров'ям, впливає на ефективність використання шрифту Брайля. Коригування розміру крапок або інтервалів між ними може покращити читабельність для людей із такими особливостями [30];
- адаптація та навчання: особам із набутою сліпотою може знадобитися спеціальне навчання для переходу від візуального до тактильного читання з адаптацією до поверхонь Брайля на основі залишкових сенсорних можливостей [30].

Аналізуючи такі проблеми, необхідно орієнтуватися на створення брайлівських моделей, розробляючи та оптимізуючи процеси й матеріали для шрифту Брайля, а також створюючи інклюзивне середовище та освітні програми для задоволення різноманітних потреб людей із порушеннями зору та незрячих осіб [31].

Для вирішення пов'язаних із вадами зору, науковці досліджують різноманітні технології, спрямовані на покращення умов життя людей з обмеженими можливостями. Ось деякі приклади актуальних тем дослідження:

- впровадження інклюзивної освіти для людей із вадами зору та незрячих осіб [32];
- удосконалення поліграфічних технологій якості формування шрифту Брайля для забезпечування можливості зчитувати інформацію з таблиць, тощо [32];
- покращення інформаційних систем, що дають змогу особам із порушеннями зору та незрячим зчитувати й обробляти інформацію з електронних ресурсів за допомогою тактильних пристроїв [33].

Особливо останнім часом значну увагу приділяють штучному інтелекту, який здатен здійснити технологічний прорив у розвитку інформаційних технологій та сприяти вирішенню проблем, пов'язаних із вадами зору, а також удосконаленню технологій і програмного забезпечення [33].

Наукове дослідження, присвячене формуванню шрифту Брайля на тактильних моделях, вимагає аналізу критеріїв і проблем тактильного сприйняття довкілля незрячими людьми. Це є важливою складовою розроблення ефективних рішень для їх інтеграції в суспільство. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) приділяє значну увагу питанням інклюзії та адаптації навколишнього середовища для людей з порушеннями зору, надаючи рекомендації щодо покращення якості їхнього життя [27–34]. Розглянемо ключові аспекти, критерії та проблеми, пов'язані з тактильним сприйняттям.

1. Ключові критерії тактильного сприйняття незрячими людьми. Тактильне сприйняття відіграє критичну роль у просторовій орієнтації та взаємодії незрячих людей із довкіллям. Основні критерії включають:

- поверхні та текстури. Люди з порушеннями зору орієнтуються за допомогою тактильних відчуттів, торкаючись різних поверхонь, щоб розрізнити їхню текстуру та призначення [34];
- розмір і форма об'єктів. Дрібні об'єкти або складні форми можуть важче сприйматися на дотик. Простота та зрозумілість дизайну удоступнюють їхню ідентифікацію [34];
- температура та вібрації. Температурні та вібраційні відчуття також допомагають незрячим людям орієнтуватися в навколишньому середовищі, дозволяючи розпізнавати предмети й матеріали за температурними характеристиками або реакцією на дотик [34].

На основі проведеного аналізу виконаємо порівняльне зіставлення в таблиці 1.3.1, у якій будуть представлені проблеми тактильного сприйняття навколишнього середовища незрячими людьми та можливі шляхи їх розв’язання.

Таблиця 1.3.1

**Проблеми сприйняття незрячими людьми навколишнього середовища
та шляхи їх розв’язання**

Критерій	Проблеми	Рішення
Тактильні поверхні	Нестача тактильних орієнтирів у містах, закладах та у громадських місцях	Встановлення тактильних знаків, написів, голосових інструментів; використання контрастних і чітко помітних матеріалів на дотик [34]
Текстури та форми	Складність сприйняття складних або дрібних об’єктів на дотик	Простота та ергономіка дизайну предметів та інфраструктури [34]
Тактильна інформація на предметах	Недоступність тактильних позначень на інформаційних знаках, табличках	Використання шрифтів Брайля і тактильних символів
Просторова орієнтація	Складність орієнтування у великих відкритих просторах або під час перетину вулиць	Створення тактильних карт і систем звукової навігації [34]
Когнітивне навантаження	Висока залежність від тактильних відчуттів може спричиняти втому і стрес	Інтеграція допоміжних технологій (наприклад, звукових або вібраційних сигналів) [34]

1.4. Аналіз штучного інтелекту. Перспективи інтеграції штучного інтелекту в 3D-моделюванні та в адитивному виробництві

Інтеграція штучного інтелекту в 3D-моделювання (рис. 1.4.1) та адитивне виробництво відкриває нові можливості для інновацій, що можуть суттєво покращити виробничі процеси. Крім того, ця інтеграція має потенціал трансформувати інклюзивне середовище для незрячих людей, створюючи більш доступні та інклюзивні умови [35].

Технології, керовані штучним інтелектом, зокрема машинне навчання, широко застосовуються для розв'язання багатьох проблем у 3D-моделюванні та АВ, включаючи кластеризацію, регресію та класифікацію [36].

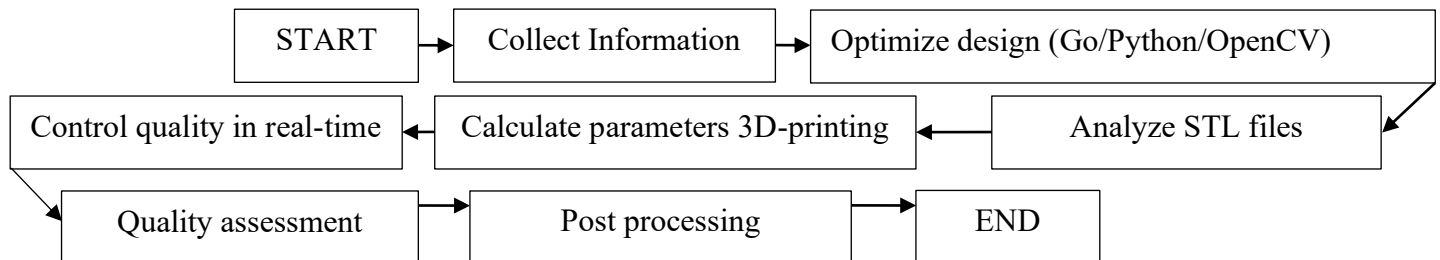


Рис. 1.4.1 Принцип інтеграції ІІІ у процеси адитивного виробництва

Розглянемо основні технології штучного інтелекту та їх можливу інтеграцію в адитивне виробництво:

1. Машинне навчання (Machine Learning): цей метод дозволяє моделі навчатися на основі даних і покращувати результати із часом. Метод може застосовуватися для створення більш реалістичних 3D-моделей та автоматизації процесів моделювання [37].

2. Глибоке навчання (Deep Learning): використовує нейронні мережі. Особливо ефективно для обробки зображень та створення деталізованих 3D-моделей [38]. В основі архітектури глибокого навчання є згорткові нейромережі (CNN), які аналізують рельєфні елементи 3D-моделей, покращуючи контроль якості.

3. Генетичні алгоритми (Genetic Algorithms, GA): ці алгоритми імітують принципи еволюції для пошуку оптимальних рішень. Їх можна використати для оптимізації параметрів моделювання та створення унікальних прототипів [39].

4. Системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems): ці системи допомагають користувачам приймати більш обґрунтовані рішення, використовуючи дані та алгоритми ІІІ. Вони можуть бути інтегровані у процес

моделювання для підвищення точності та ефективності виробництва [40].

5. Комп'ютерний зір (Computer Vision): ця технологія дає змогу комп'ютерам аналізувати та інтерпретувати зображення. Вона може застосовуватися для автоматичного створення 3D-моделей із фотографій або відео [41]. Завдання CV включають виявлення дефектів (наприклад, недостатньо чіткий рельєф крапок), порівняння 3D-моделі з реальним відбитком для виявлення розбіжностей, оптимізацію геометрії крапок Брайля на етапі моделювання.

6. Робототехніка (Robotics): може бути інтегрована для автоматизації процесів моделювання та створення фізичних моделей [42]. Ці технології можуть бути використані в поєднанні з іншими методами ІІІ для створення більш сучасних і ефективних систем 3D-моделювання. ІІІ дозволяє задавати комп'ютеру певні правила та алгоритми, які сприяють навчанню машин на основі великих наборів даних. Використання ІІІ дозволяє зменшити обсяг ручної роботи на різних етапах адитивного виробництва, забезпечуючи доступ до великих обсягів і високу точність даних [43–45].

Інтеграція штучного інтелекту в адитивні технології та 3D-моделювання має такі переваги: 1) продуктивність – може значно прискорити процес створення моделей, оптимізуючи параметри та усуваючи помилки; 2) автоматизація – дозволяє автоматизувати багато етапів виробництва, що знижує витрати на робочу силу; 3) підвищення якості – може аналізувати дані в реальному часі та коригувати процес для поліпшення якості кінцевого продукту; 4) інновації – сприяють розробці нових технологій і методів, що можуть бути впроваджені в адитивних процесах [46, 47].

На основі проведеного аналізу виконаємо порівняння переваг використання штучного інтелекту: 1) може прискорити процес створення моделей, тоді як 3D-моделювання зазвичай потребує більше часу та зусиль для досягнення високої точності; 2) забезпечує високу якість, зокрема завдяки ефективній оптимізації процесу, у той час, як 3D-моделювання пропонує велику гнучкість і

точність, що особливо важливо для створення моделей Брайля [48];
 3) ШІ сприяє інноваціям та автоматизації, що позитивно впливає на вдосконалення виробничих процесів [48].

ШІ може значно покращити процес створення 3D-моделей Брайля, надаючи інструменти та технології, які спрощують і прискорюють ключові етапи виробництва: автоматизація генерації моделей – автоматичне створення 3D-моделей Брайля на основі текстових описів або зображень, що дозволяє суттєво скоротити час створення моделей вручну; оптимізація дизайну, аналіз наявних моделей та пропозиція покращень (зменшення розміру елементів, зміна розташування крапок) для підвищення зручності тактильного сприйняття; прогнозування вимог – аналіз даних поведінки користувачів для передбачення їх потреб, що дозволяє створювати більш адаптовані та функціональні моделі Брайля; інтеграція з іншими технологіями – поєднання з віртуальною та доповненою реальністю для створення інтерактивних 3D-моделей Брайля, які можуть використовуватись в освітніх цілях; навчання та адаптація – адаптація моделей до індивідуальних потреб користувачів на основі їх уподобань [49]. Для зручності наведемо в таблиці 1.4.1 основні етапи виробництва 3D-моделей Брайля та способи застосування штучного інтелекту на кожному з них

Таблиця 1.4.1

Інтеграція штучного інтелекту на різних етапах виробництва

Етап виробництва	Застосування ШІ	Переваги
3D-моделювання	Генерація тактильних символів Брайля з урахуванням стандартів	Виключення помилок розмітки, автоматизація процесу
Оптимізація топології	Алгоритми оптимізації рельєфу для точного формування букв	Поліпшення читабельності рельєфного шрифту Брайля
Симуляція тактильних властивостей	Аналіз поверхні та передбачення зручності читання Брайля	Гарантія високої якості друку
3D-сканування та контроль якості	Машинний зір та нейромережі для виявлення дефектів	Автоматизація контролю та зменшення недоліків

Продовження таблиці 1.4.1		
3D-друк	Автоматичне калібрування принтера та налаштування параметрів друку	Забезпечення точного рельєфу та довговічності символів

Здатність штучного інтелекту використовувати набори даних, навчати нейронні мережі та застосовувати комп'ютерний зір забезпечить оптимізацію адитивного виробництва [90]. Таким чином, використання штучного інтелекту в 3D-моделюванні і сприятиме не тільки прогресу в спеціалізованих галузях, а й значному підвищенню якості готової продукції [91]. Інтеграція штучного інтелекту на всіх етапах адитивного виробництва від створення цифрової 3D-моделі, її аналізу та підготовки до друку – має потенціал суттєво вдосконалити процес виготовлення, зокрема тривимірних моделей Брайля, шляхом оптимізації процесів [92]. Однак, попри численні переваги, використання ШІ також має певні недоліки: галюцинації під час аналізу, представлення неправдивої інформації, висока вартість розроблення та інтегрування в процеси, необхідність постійно контролювати роботу штучного інтелекту та покращувати його роботу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Опрацьовано науково-технічні джерела, проаналізовано сучасний стан, актуальність і тенденції розвитку інформаційних технологій 3D-моделювання, процесів адитивного виробництва, а також проблем інклюзії для людей з порушеннями зору та незрячих. Завдяки зазначеним технологіям з'являються можливості для створення різних прототипів і деталей, застосовуючи їх у різних галузях промисловості – від машинобудування до виготовлення тактильних моделей зі шрифтом Брайля для незрячих осіб.
2. Досліджено технологічні аспекти інтегрування штучного інтелекту у процес формування шрифту Брайля на прототипах та 3D-моделях. Проаналізовано методи та алгоритми штучного інтелекту, їх переваги та обмеження.

3. З'ясовано, що теоретичні засади, методологія аналізу адитивних технологій і тривимірної графіки потребують вдосконалення. Проведено комплексний аналіз адитивного виробництва, типів 3D-друку, сфер його використання та ключових аспектів технології.

РОЗДІЛ 2.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ВИБІР ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМУВАННЯ ШРИФТУ БРАЙЛЯ НА ОСНОВІ 3D- МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Аналіз факторів впливу на вибір технології 3D-моделювання для формування шрифту Брайля

У формуванні шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання доцільно розділити методи й технології, оскільки створення 3D-моделювання для тактильних моделей і прототипів вимагає високої точності. Процес включає: *побудову рельєфів* – створення опуклих або вдавлених точок і символів із високою роздільною здатністю важливе для друку тактильних моделей, зокрема шрифту Брайля. Система повинна враховувати мінімальні допуски, щоб символи були чітко відчутні на дотик; сканування – застосування технологій 3D-сканування для створення точних протезів за формою кінцівок користувача, а також форм, адаптованих до тактильного сприйняття [60].

Завдяки здатності створювати в САПР точні та складні конструкції, ці системи мають численні переваги порівняно з традиційними методами виробництва. Однак через велику кількість різних типів САПР-систем визначити, яка найкраще відповідає потребам виробництва шрифту Брайля, може бути складно [61].

Багато сучасних САПР-систем моделювання використовує архітектуру клієнт-сервер, за якої сервер зберігає спільну модель і відстежує зміни, внесені клієнтом. Формат файлу STL є найбільш поширеним для цього типу систем [62, 63].

3D-моделювання дозволяє швидко створювати прототипи, що зменшує час на виробництво та допомагає уникнути зайвих фінансових витрат. За допомогою створення цифрової тривимірної моделі можна виготовляти високоякісні тактильні моделі з рельєфно-крапковим шрифтом Брайля [89]. Однак для створення таких моделей необхідно дослідити інформаційні системи, які застосовують для 3D-моделей, оскільки не все програмне забезпечення дозволяє

створювати тактильні моделі [64, 89]. З метою вирішення цієї проблеми було проведено аналіз програмного забезпечення. Для зручності результати подано у вигляді таблиці 2.1.1.

Таблиця 2.1.1

Порівняльний аналіз ПЗ для 3D-моделювання

НАЗВА ПЗ	ТИП	ПІДТРИМКА СТВОРЕННЯ ТЕКСТУ ШРИФТОМ БРАЙЛЯ
Autodesk Fusion 360	професійний	+
Autodesk Inventor	професійний	+
SolidWorks	професійний	+
Blender	професійний	частково підтримує
FreeCAD	професійний	+
OnShape	простий	+
OpenSCAD	професійний	+ через скрипти
Rhino	професійний	+
TouchSee	простий	+ автоматично генерує в стандартну модель

Згідно з проведеним аналізом, наведеним у таблиці 2.1.1, можна зробити висновок, що не всі додатки підтримують створення тексту шрифтом Брайля. А ті, що й мають таку можливість, часто вимагають встановлення додаткових розширень, які не завжди задокументовані або очевидні. Саме тому виникла потреба в окремому аналізі додатків для 3D-моделювання, де першим критерієм відбору була здатність створювати твердотільні об'єкти, а не анімації. Виокремивши додатки, які підтримують моделювання твердих деталей, а згодом – і підтримка тексту шрифтом Брайля, дозволить виробникам обирати програмне забезпечення відповідно до власних потреб [64]. Водночас вибір програмного забезпечення для 3D-моделювання з формуванням шрифту Брайля – це лише початковий, але не єдиний фактор. Фактори, які впливають на створення тривимірної брайлівської моделі, можуть бути різними. Серед них – три ключові складові (подані в таблиці 2.1.2). Ці частини визначають: 1) позицію крапок (6-

крапкові або 8-крапкові системи); 2) висоту та глибину крапок для якісного сприйняття; 3) специфічні символи для різних мов.

Таблиця 2.1.2

Бінарний вигляд і позиція крапки кожної букви

Символ	Бінарний вигляд	Позиції крапок
А	100000	Верхня ліва
В	101000	Верхня ліва, середня ліва
С	110000	Верхня ліва, верхня права

Матриці для представлення символів на 3D-моделі формуються на основі бінарного кодування, де кожен символ шрифту Брайля подається як бінарна матриця: 1 відповідає опуклій крапці, а 0 – відсутності крапки. Такі матриці використовують для автоматичного генерування брайлівських символів на поверхні 3D-моделей.

Наведемо приклад матриці, вказавши для символу «А» (100000) матриця буде:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ x_3 & x_4 \\ x_5 & x_6 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.1.1)$$

Ці матриці важливі у формуванні тактильних моделей, оскільки дають змогу точно контролювати розташування і кількість точок кожного символу.

Матрицю для розміщення шрифту Брайля на тривимірній поверхні можна побудувати у випадку введення будь-якого тексту з N символів. У такому разі схема

розміщення символів на прямокутній площині матиме вигляд:

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots x_{1,N} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots x_{2,N} \\ x_{3,1} & x_{3,2} & \dots x_{3,N} \end{pmatrix} \quad (2.1.2)$$

$x_{...}$ = означає кожен крапку Брайля в матричній сітці. 3D-принтер повинен розміщувати крапки відповідно до цієї матриці, забезпечуючи точність висоти, відстані між крапками та загального позиціонування. Моделювання крапок потребує точного дотримання параметрів (висоти, радіусу та відстані між крапками) відповідно до стандартів, а саме:

- радіус крапки
- висота крапки
- відстань між символами
- відстань між рядками
- ширина сітки крапок Брайля
- висота сітки крапок Брайля
- відступ по краях прямокутника
- кількість сегментів на моделі

На основі цих параметрів сформуємо прямокутну 3D-модель (рис. 2.1.1) розміром 50x50 мм.

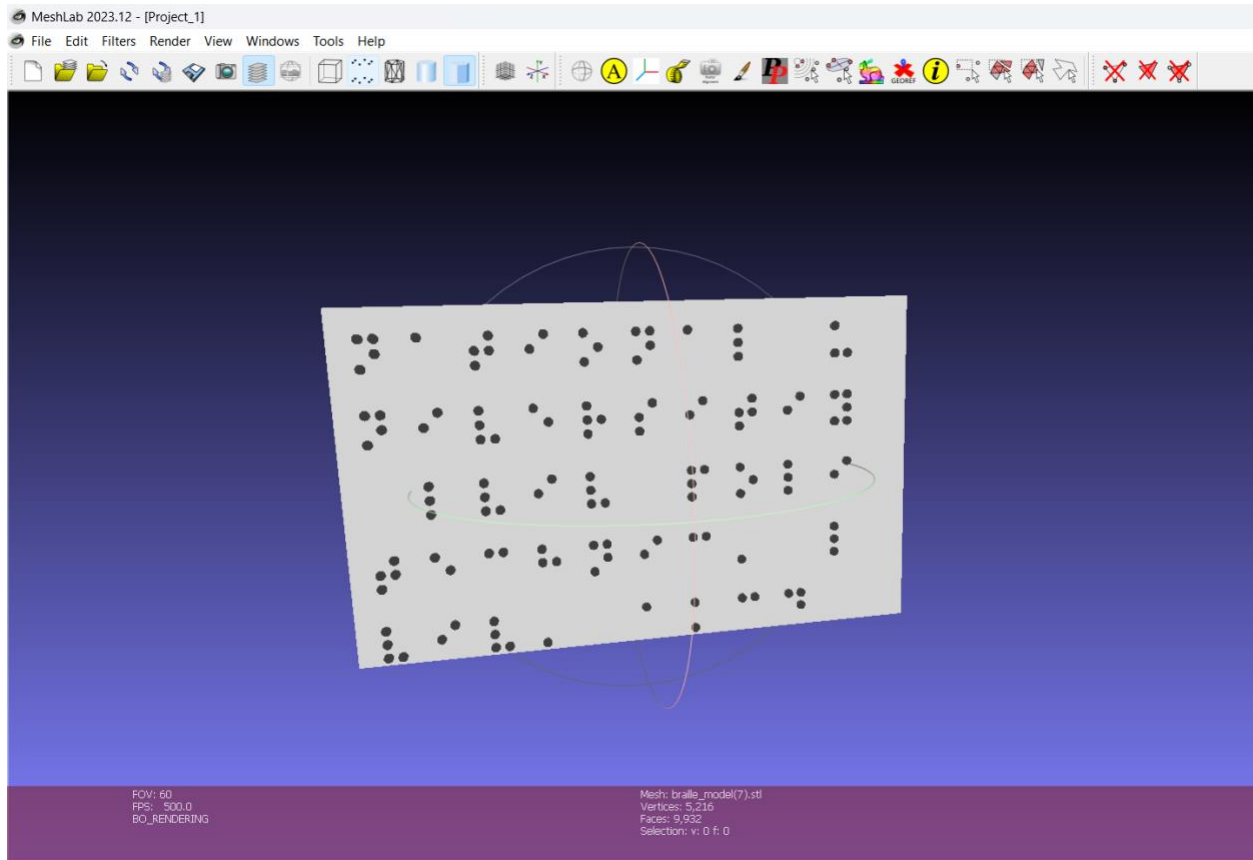


Рис. 2.1.1. Приклад 3D-тактильної моделі

Розгляньмо фактори, які впливають на якість формування шрифту Брайля в процесах 3D-моделювання:

1. Методи створення 3D-моделі: моделювання сітки (створення зв'язків, таких як ребра, грані та вершини), тверде моделювання (представлення самої моделі), параметричне моделювання (на основі параметрів, ітераційний процес).
2. Розмір крапок та інтервали між ними.
3. Висота крапки.
4. Розташування крапки.
5. Текстура поверхні (гладкість, шорсткість) .
6. Товщина моделі.
7. Узгодженість із міжнародними стандартами (UEB) .
8. Обмеження програмного забезпечення.

9. Сфера застосування майбутньої моделі.

10.Методи нанесення шрифту Брайля (recessed/raised).

11.Форма символів (плоска, напівсферична).

Як бачимо, є 11 основних факторів, які впливають на створення цифрової 3D-моделі з формуванням шрифту Брайля, але водночас можуть бути й додаткові фактори, які складно визначити і які проявляються лише у разі нестандартних рішень при створенні тривимірної моделі.

Також є інша складність, що виникає при формуванні шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання – коли модель є досить складною, а встановлення стандартних розмірів крапок не є оптимальними для вирішення і потребують додаткових розрахунків. Для цього в нашому дослідженні для адаптивної генерації тексту будемо використовувати нечітку логіку. Застосування нечіткої логіки дозволяє оптимізувати процес створення 3D-моделей шрифту Брайля з урахуванням таких факторів:

- зміна відстані між крапками: залежно від масштабу моделі та бажаного розміру відстань між крапками може змінюватись. Нечітка логіка допомагає адаптувати параметри моделі до реальних розмірів об'єкта, особливо якщо друк здійснюється на різних типах 3D-принтерів;
- адаптивні розміри крапок: нечіткі правила можуть коригувати розміри точок залежно від поверхні, на якій вони друкуються (наприклад, якщо поверхня вигнута чи плоска) [65];
- компроміси між точністю і можливостями друку: у деяких випадках для досягнення оптимальної якості 3D-моделі потрібно враховувати обмеження, пов'язані з характеристиками матеріалів або специфікою роботи принтера [65].

Отже, застосування нечіткої логіки допомагає автоматизувати процес створення тактильного тексту на моделях, адаптовуючи його до конкретних умов 3D-друку. Крім того, у процесі формування тактильного тексту використовують

методи математичного моделювання для точного розташування точок Брайля.

Для коректного розміщення точок Брайля на 3D-моделі застосовуються математичні формули та алгоритми. Ці моделі визначають: 1) розташування точок по осях X, Y, Z відносно загальної поверхні моделі; 2) обчислення радіусів точок для створення правильного рельєфу; 3) моделювання кривих поверхонь, що є важливим аспектом для прототипів і вигнутих тактильних моделей, де крапки Брайля мають відповідати контурам поверхні; 4) формули для точного позиціонування крапок.

Для кожної крапки використовується $T(a, b, c)$, будемо використовувати рівняння для розрахунку координат X, Y, Z:

$$\begin{aligned} a &= a_0 + \beta \cdot (i - 1) \\ b &= b_0 + \beta \cdot (i - 1) \\ c &= c_0 + \beta \cdot (k - 1) \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

де a_0, b_0, c_0 є початковою позицією символу, β – відстань між крапками; i, j, k – є індексами крапок у матриці.

Символи Брайля у 3D-моделях зазвичай представлено у вигляді матриць. Кожен символ шрифту Брайля можна подати у форматі матриці розміром 3x2 (шестикрапкова система) або 4x2 (восьмикрапкова система). Такий підхід дозволяє застосовувати алгоритми лінійної алгебри для автоматичного розміщення крапок на площині чи в об'ємі моделі [66].

Аналіз формування шрифту за допомогою 3D-моделювання, створення тактильних моделей зі шрифтом Брайля для 3D-друку вимагає комплексного підходу, що включає використання таблиць символів, матриць для представлення точок, а також адаптивних методів, таких як нечітка логіка для генерації символів на поверхнях різної складності. Застосування цих методів забезпечує точність і функціональність як тактильних моделей, так і прототипування, що створюються з використанням 3D-технологій.

2.2 Аналіз технологій 3D-друку і їх вплив на якість формування шрифту Брайля

Аналіз технологій 3D-друку і їх вплив на якість формування шрифту Брайля передбачає порівняння різних методів 3D-друку, оцінювання точності їх виведення, придатності для створення рельєфних крапок для тексту Брайля. Якість сформованих шрифтів Брайля на тривимірних тактильних моделях залежить від точного відтворення крапок, інтервалів між ними і структурної цілісності друкованого матеріалу. Для цього необхідно визначити ключові параметри, що впливають на ефективність формування шрифту Брайля на 3D-моделі в процесах адитивного виробництва [67].

Діаметр крапки (D): стандартний діаметр крапок Брайля становить 1,44 мм [68].

1. Висота крапки (H): крапки Брайля мають бути підняті на 0,48 мм, для кращого тактильного сприйняття незрячими людьми.
2. Відстань між крапками (S): відстань між центрами суміжних точок має становити 2,34 мм по горизонталі та 2,44 мм по вертикалі.
3. Товщина основи або шару (T): товщина основи має вирішальне значення для збереження структурної цілісності моделі [68].

Ці параметри є стандартними для різних моделей. У деяких випадках коли модель є індивідуальною або складною, параметри можуть змінюватися. Проте стандартні параметри гарантують, що текст шрифтом Брайля буде точно відтворений на 3D-принтері, хоча різні технології забезпечують різні рівні точності [67].

Щоб з'ясувати, як технології 3D-друку можуть впливати на якість формування шрифту Брайля, необхідно виконати першу ітерацію аналізу, які технології існують. Для цього виконаємо порівняння:

1. FDM/FFF: точність – від низької до середнього середньої ($\pm 0,1-0,2$ мм); якість поверхні – від низької до середньої; роздільна здатність (вісь XY) – 100–300 мкм; придатність – прийнятна для

прототипування, неідеальна для дрібного шрифту Брайля; переваги та недоліки – недорогий, широко доступний, груба обробка поверхні, обмежене відтворення дрібних деталей [69].

2. SLA (Stereolithography): точність – висока ($\pm 0,05$ мм); якість поверхні – висока; роздільна здатність (вісь XY) – 25–100 мкм; придатність – ідеальний для точного формування крапок Брайля; переваги – висока точність, гладка поверхня, ідеальна для тактильних застосувань; недоліки – висока вартість, повільний процес [69].
3. DLP (Digital Light Processing): точність – висока ($\pm 0,05$ мм); якість поверхні – вища за середню; роздільна здатність (вісь XY) – 25–100 мкм; придатність – підходить для високоякісних крапок Брайля; переваги – висока роздільна здатність, гладка поверхня, швидке затвердіння; недоліки – обмежені варіанти матеріалів [69].
4. SLS (Selective Laser Sintering): точність – від середньої до високої ($\pm 0,1$ мм); якість поверхні – від середньої до високої; роздільна здатність (вісь XY) – 100–200 мкм; відповідність до формування шрифту Брайля; придатність – добре підходить для функціональних прототипів із хорошою точністю шрифту Брайля; переваги – міцні, функціональні деталі, не потребують опор; недоліки – поверхня може бути шорсткою, знижена роздільна здатність для дуже дрібних крапок [69].
5. DMLS (Direct Metal Laser Sintering): висока точність ($\pm 0,05$ мм); якість поверхні – середня; роздільна здатність (вісь XY) – 50–200 мкм; підходить для виготовлення металевих шрифтів Брайля; переваги – міцні, довговічні деталі, придатні для промислового використання; недоліки – дороге, грубе покриття дрібних деталей [69].

6. PolyJet: точність – дуже висока ($\pm 0,01$ мм); якість поверхні – висока; роздільна здатність (вісь XY) – 16–32 мкм; ідеальний для формування крапок Брайля з надтонкими деталями; переваги – дуже висока роздільна здатність, гладка поверхня, можливість використання різноманітних матеріалів для друку; недоліки – висока вартість, переважно використовується для створення прототипів [69].

Наступним кроком у створенні шрифту Брайля є врахування точності друку, оскільки розміри крапки Брайля зазвичай становлять 1.44–1.6 мм у діаметрі з висотою близько 0.4 мм. SLA та DLP технології забезпечують найвищу точність (до 25 мікрон), що дозволяє відтворювати брайлівські рельєфні крапки з високою деталізацією та рельєфністю.

.Формула для розрахунку мінімального діаметра крапки, який може бути відтворений на принтері з роздільною здатністю Δx , виглядає так:

$$B_{min} \geq \frac{1}{\Delta x} \quad (2.2.1)$$

Для технології SLA, де Δx встановимо 40 мікрон:

$$B_{min} = \frac{1}{40 \times 10^{-6}} = 0.025$$

Згідно з отриманими результатами за формулою 2.2.1 можемо дійти висновку, що SLA здатна відтворити деталі, значно менші за розмір крапки Брайля (1.4–1.6 мм), забезпечуючи високу точність.

Для тексту шрифтом Брайля на моделях важливо, щоб поверхня точок була гладкою, оскільки користувачі повинні легко відчувати рельєф. У цьому аспекті технології SLA та DLP мають перевагу завдяки використанню рідких фотополімерів, які тверднуть шарами, створюючи дуже гладку поверхню. Технологія SLS, що використовує порошкові матеріали, наприклад, нейлон або

метал, створює моделі з високою міцністю, що особливо корисно для довготривалого використання та масового виробництва тактильних моделей [70]. Для оцінки міцності та стійкості до розриву тактильних моделей наведемо відповідний математичний вираз:

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (2.2.2)$$

де σ – напруга на розрив; P – сила, прикладена до об'єкта; S – площа поперечного перерізу.

Враховуючи, що тактильні моделі Брайля повинні витримувати постійне використання, технології SLS, DLP, SLA, які використовують більш міцні матеріали (наприклад, нейлон та інші полімери), є кращими у випадках, коли довговічність є ключовим фактором. Натомість технологія FDM може застосовуватися для тактильних моделей із простим текстом Брайля, що не передбачають масового використання та коли і є необхідність зменшити фінансові витрати і прискорити процес створення моделей на основі технологій FDM/FFF. Отже, FDM є найдоступнішою і найпоширенішою технологією з низькою вартістю, однак вона має недоліки щодо якості поверхні та точності. Для персональних потреб або експериментів FDM може бути вигідним рішенням, але для професійного виробництва брайлівських моделей слід розглядати SLA або SLS, які, хоч і дорожчі, забезпечують кращу якість друку.

У той час як технологія FDM залишає видимі шари, що може погіршувати тактильні властивості шрифту Брайля, SLA та DLP технології забезпечують мінімальну шорсткість, що критично для комфортного сприйняття крапок.

Отримавши результати аналізу та визначивши технології 3D-друку, будемо використовувати узагальнені дані у таблиці 2.2.1.

Таблиця 2.2.1

Порівняльний аналіз технологій 3D-друку

Тип 3D-друку	Точність	Якість поверхні	Швидкість друку	Міцність	Вартість	Матеріали
1	2	3	4	5	6	7
FDM/FFF	100–300	Середня	Середня	Висока	Низька	Пластик PLA, ABS
SLA	25–100	Дуже висока	Повільна	Середня	Середня	Фотополімери
SLS	50–200	Висока	Швидка	Дуже висока	Висока	Порошки, нейлон, метал
DLP	25–100	Дуже висока	Середня	Середня	Середня	Фотополімери
PolyJet	14–85	Дуже висока	Висока	Середня, залежить від матеріалу	Висока	Фотополімери еластичні матеріали, композити

Щоб отримати високоякісні тактильні прототипи зі сформованим шрифтом Брайля, необхідно виконати геометричні розрахунки з урахуванням висоти елементів та міжкрапкового інтервалу, беручи до уваги, що текст шрифтом Брайля формується за типом матриці 3х2.

Розглянемо модель у тривимірному просторі, у якій кожен символ має координати X, Y, Z, і опишемо її математичним виразом:

$$\begin{aligned}
 X_{ij} &= X_0 + i \cdot H_x \\
 Y_{ij} &= Y_0 + j \cdot H_y \\
 Z &= Z_0 + HR
 \end{aligned}
 \tag{2.2.3}$$

де X_0, Y_0, Z_0 – представлені початковими координатами для сітки брайлівських символів; H_x – є горизонтальною відстанню між крапками Брайля (2,34 мм); H_y – це вертикальна відстань між крапками (2,44 мм); HR – висота рельєфної крапки (0,48 мм).

Оскільки визначити точність діаметра елементів шрифту Брайля є складним завданням, особливо на складних геометричних моделях, під час нанесення тексту

шрифтом Брайля на 3D-моделі можуть виникати значні похибки. Тому необхідно мінімізувати кількість похибок. Для мінімізації похибок у тексті, виконаному шрифтом Брайля на 3D-моделях, запишемо вираз, у якому діаметр – (D_{error}) ; (H_{error}) – висота, A – допустиме значення похибки:

$$A = \frac{|D_{actual} - D_{ideal}|}{D_{ideal}} \times 100\% \quad (2.2.4)$$

$$A = \frac{|H_{actual} - H_{ideal}|}{H_{ideal}} \times 100\%$$

Зазначимо, що коли A перевищує 10%, шрифт Брайля незряча людина тактильно не зможе зчитати.

Хоча на формування шрифту Брайля впливають й інші фактори, зокрема технології 3D-друку, необхідно провести аналіз основних технологій, які можуть бути використані для створення брайлівських моделей у процесах адитивного виробництва:

- FDM/FFF: через обмежену роздільну здатність принтерам FDM складно забезпечити точну побудову дрібних елементів, необхідних для шрифту Брайля, що часто призводить до неточного розміщення крапок, грубої текстури поверхні, утруднення тактильного зчитування.
- SLA/DLP та PolyJet: ці технології забезпечують набагато вищу роздільну здатність і гладкість поверхні, що робить їх ідеальними для створення тактильних точок Брайля з точними розмірами та відстанню між ними.
- SLS: хоча ця технологія 3D-друку дозволяє досягти високої точності, шорсткість поверхні все одно може впливати на тактильне сприймання. Проте вона підходить для промислового застосування, де потрібні міцні й довговічні деталі.

Для фінального вибору технології 3D-друку необхідно здійснити математичний аналіз вибору технології. Для цього використаємо метод мультикритеріального

аналізу з ваговими коефіцієнтами для визначення оптимальної технології на основі таких критеріїв, як:

- точність (Т)
- якість поверхні (Q)
- міцність (Н)
- вартість (Р)

Кожному з критеріїв призначається вага ω_i залежно від його важливості для виготовлення моделі Брайля. Підсумкове значення ефективності кожної технології обчислюється за формулою:

$$M = \omega_T \cdot T + \omega_Q \cdot Q + \omega_H \cdot H + \omega_P \cdot \frac{1}{P} \quad (2.2.5)$$

Наступним кроком наведемо приклад, у якому кожна технологія має однакові значення критеріїв, а саме:

$$\omega_T = 0.4; \omega_Q = 0.3; \omega_H = 0.2; \omega_P = 0.1$$

Таблиця 2.2.2

Технології 3D-друку і їх вагові значення

Технології	Т	Q	Н	Р	Фінальне значення
SLS	4	4	5	4	4.2
SLA	5	5	3	3	4.4
DLP	5	5	3	3	4.4
FDM	2	2	3	5	2.2
PolyJet	5	5	3	3	4.4

На основі результатів, отриманих у таблиці 2.2.2, встановлено, що оптимальними технологіями 3D-друку для створення брайлевських моделей є DLP, SLA та PolyJet. Ці технології дозволяють створювати міцні і якісні брайлівські тактильні моделі. Натомість інші технології, зокрема FDM, хоча й економічно

вигідніші, поступаються якістю.

Також слід зауважити, що на кінцеву якість брайлівських 3D-моделей впливає постдрукарська обробка поверхні моделей. Для кожної 3D-моделі використовують індивідуальні методи обробок. Наприклад, моделі, надруковані на FDM-FFF (ABS-PLA пластику), можуть оброблятися певними хімічними засобами. Водночас для моделей, надрукованих за допомогою фотополімеризації (SLA-DLP), застосовують інші хімічні засоби. Наведемо приклади засобів, які використовують на етапі післядрукарської обробки:

- Хімічні засоби, які використовують на етапі постдрукарської обробки. Ці засоби є ключовими факторами, що впливають на якість готової тактильної 3D-моделі
 - FDM-FFF printing: **ацетон** – згладжує моделі на основі ABS-пластику. Температура згладжування пари – 50–60°C. Час замочування – 10–20 хв (легке згладжування), до 30 хв (інтенсивне згладжування). Концентрація – 99–100%; **ізонпропіловий спирт** – очищення та покращення адгезії. Концентрація – 100%. Час замочування – швидко протирання для загального очищення або 5–10 с. на ділянку; **епоксидні смоли та фарби** – зміцнення, захист від пошкоджень; співвідношення суміші – 1:1 або 2:1 за об'ємом або вагою, залежно від типу смоли. Час затвердіння – start 2–4 год., full – 24–72 год. при кімнатній температурі. Товщина шару смоли – 0,1–0,5 мм, фарби – 0,05–0,1 мм на шар.
 - SLA-DLP printing: **ізонпропіловий спирт, етанол** – для видалення залишків смоли, згладжування, підготовки до УФ-затвердіння. Концентрація спирту – 90–99%, етанолу – 90–95%. Час замочування – 3–5 хв, але не більше 10 хв; **УФ-затвердіння** – покращує міцність. Довжина хвилі – 365–405 нм. Час затвердіння – від 5–30 хв.; **герметики та додаткові покриття** – захист від УФ-випромінювання та вологи,

покращення тактильності. Товщина – 0,05–0,2 мм на шар. Кількість шарів – 1–2. Час висихання – 1–48 годин (залежно від виду засобу).

- SLS printing: *лужні розчинники* – очищення від залишків, покращення гладкості. Концентрація – 1–5%. Час замочування – 2–5хв. pH – 9–11; *поліуретанові та епоксидні покриття* – міцність, вологостійкість, гладкість. Товщина нанесення – 0,05–0,2 мм на шар. Час затвердіння – 30 хв – 24 год. Кількість шарів – 1–3 [71].

Наступним кроком для врахування факторів, які впливають на вибір технологій, є аналіз вартості. Для цього проведемо порівняння між традиційною технологією виробництва та 3D-друком:

Традиційні методи виробництва включають: механічну обробку – наприклад, фрезерування або лазерне різання з подальшою ручною або напівавтоматичною обробкою; 2) лиття під тиском або штампування – передбачає виготовлення пресформи або штампу, після чого відбувається масове лиття пластикових деталей; 3) ручне виготовлення або комбіновані технології – значну частину обробки виконують вручну.

Переваги: при масовому виробництві (тираж понад 1000 шт) високі початкові вкладення (розроблення штампа, налаштування виробничої лінії) розподіляються на велику кількість виробів, що дозволяє знизити собівартість одиниці продукції до дуже низького рівня; забезпечується висока стабільність якості завдяки стандартизації виробничого процесу.

Недоліки: для невеликих тиражів (до 100 шт) фіксовані витрати на розроблення інструменту та налаштування обладнання значно підвищують собівартість одиниці продукції; обмежена гнучкість: внесення змін до дизайну вимагає створення нових штамсів або переналаштування обладнання, що збільшує час і витрати на виробництво.

3D-моделювання та 3D-друк дозволяють безпосередньо перетворювати цифрову 3D-модель на фізичний об'єкт без необхідності виготовлення штампів. Розглянемо чотири поширені технології:

1. FDM/FFF (Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication).

Матеріали: пластики (PLA, ABS тощо) за ціною приблизно \$20–40 за кілограм. Переваги: низька вартість обладнання (настільні принтери коштують \$300–1000), економічність матеріалів, простота заміни моделі. Обмеження: середня роздільна здатність – достатня для тактильних моделей, проте деталі (наприклад, чіткість шрифту Брайля) можуть бути менш чіткими порівняно з іншими методами.

2. SLA/DLP (Stereolithography / Digital Light Processing). Матеріали: фотополімерні смоли приблизна вартість – \$100–200 за літр. Переваги: висока роздільна здатність та деталізація, що важливо для точного відтворення шрифту Брайля. Обмеження: більш висока вартість матеріалів та необхідність ретельної постобробки (видалення підтримок, УФ-затвердіння).

3. SLS (Selective Laser Sintering). Матеріали: порошкові пластики (наприклад, нейлон), вартість яких може бути конкурентною за оптимізованого використання. Переваги: друк без підтримки, хороша механічна міцність деталей. Обмеження: більш дороге обладнання, відносно висока собівартість для одиничних виробів.

4. PolyJet. Матеріали: фотополімери, часто з можливістю друку кількома матеріалами одночасно. Переваги: дуже висока якість та роздільна здатність, можливість отримання моделей із різними властивостями (наприклад, м'якими та твердими ділянками). Обмеження: дуже висока вартість обладнання та матеріалів, що значно підвищує собівартість виробу.

Для вибору технології не менш важливим фактором є розрахунок собівартості виготовлення прототипів та моделей. Для спрощеного порівняння розглянемо виготовлення однієї тактильної моделі зі шрифтом Брайля об'ємом приблизно 100 см³.

Традиційні методи

Для виконання розрахунків вартості традиційного виробництва використовуємо формулу:

$$C_{trad} = \frac{F_{tool}}{Q} + C_{var} \quad (2.2.6)$$

F_{tool} – фіксовані витрати (штампи обладнання); Q – об'єм виробництва (тираж); C_{var} – змінні витрати на виробництво одного тиражу.

- **Низький тираж (до 100 шт):**

Фіксовані витрати: розроблення штампа, налаштування обладнання, ручне оброблення можуть призвести до собівартості 50–100\$ за одиницю.

- **Високий тираж (1000+ шт):**

Фіксовані витрати розподіляють на велику кількість виробів.

Зразкова собівартість: від 1\$ до 3\$ за модель (матеріали + автоматизований процес лиття).

Для масового виробництва традиційні методи вигідні, якщо можна компенсувати високі початкові інвестиції великим обсягом.

3D-друк

Для виконання розрахунків вартості адитивного виробництва використовуємо формулу:

$$C_{3D} = C_{mat} + C_{machine} + C_{post} \quad (2.2.7)$$

C_{mat} – вартість матеріалу (пластик, фотополімер і т.п.); $C_{machine}$ – вартість роботи обладнання (час друку, енерговитрати, амортизація); C_{post} – витрати на постдрукарську обробку (шліфування моделі, очищення і т.п.).

а) FDM/FFF

- **Матеріали:**

- Витрата: для 100 см³ моделі потрібно близько 125 г PLA (при щільності ~1.25 г/см³).

- При ціні 20\$ за 1 кг – вартість матеріалу близько 2.50\$.
- Час друку: приблизно 3 години (може змінюватись).
- Додаткові витрати: амортизація обладнання, електроенергія, мінімальна постобробка – умовно 1–2\$ за модель.
- Підсумкова собівартість: ~5–7\$ за одиницю.

b) SLA/DLP

- Матеріали:
 - Витрата смоли може бути близько 100 мл (з урахуванням густоти близько 1.1 г/мл – 110 г смоли).
 - При ціні 150 \$ за літр – вартість близько 16.50\$.
- Час друку: 2 год. плюс час на затвердіння та постобробку.
- Додаткові витрати: постобробка, праця (умовно 2–3\$ за модель).
- Підсумкова собівартість: ~20–25\$ за модель.

c) SLS

- Матеріали: порошковий нейлон – при умовному розрахунку та оптимальному використанні матеріалу (облік переробки та повернення невикористаного порошку) вартість може бути близько 15–25\$ за модель.
- Процес: часто друк ведеться партіями, що дозволяє знизити витрати на одиницю.
- Підсумок: собівартість ~20–25\$ за одиницю.

d) PolyJet

- Матеріали: дорогі фотополімери – орієнтовна вартість для однієї моделі становить 20\$.
- Додаткові витрати: більш висока вартість обладнання та необхідність складної постобробки можуть додати ще 10–20\$.
- Підсумкова собівартість: ~30–40\$ за модель.

Підсумовуючи викладене, представимо дані в таблиці 2.2.3

Таблиця 2.2.3

Параметри адитивних технологій

ПАРАМЕТРИ	ТРАДИЦІЙНІ МЕТОДИ	FDM-FFF	SLA-DLP	SLS	PolyJet
Початкові інвестиції	Високі (штампи, обладнання)	Низька настільні принтери)	Середні (спеціалізовані принтери)	Високі (промислові)	Дуже високі
Вартість матеріалів (од.)	Низька при масовому виробництві	Дуже низька	Вище ніж у FDM	Середня	Висока
Собівартість одиниці	50–100\$ (низький тираж); 1–3\$ (високий тираж)	5–7\$	~20–25\$	~20–25\$	~30–40\$
Тривалість підготовки	Довготривалий для створення штампів	Мінімальна	Мінімальна	Може бути тривалим для постобробки	Мінімальна
Гнучкість дизайну	Мінімальна (необхідно додаткові витрати)	Висока (невеликі коригування)	Висока	Середня	Висока
Якість та деталізація	Дуже висока при масовому виробництві	Середня (достатня для тактильних моделей)	Дуже висока (підходить для високоточних крапок Брайля)	Хороша	Дуже висока

Якщо потрібно виготовляти невелику кількість тактильних моделей або потрібні постійні зміни дизайну, технологія 3D-друку (особливо FDM-FFF) є найбільш економічною та гнучкою. Собівартість близько 5–7\$ за модель робить її привабливою, а відсутність необхідності в дорогому інструменті дозволяє швидко реагувати на зміни вимог.

При замовленні 1000 і більше штук традиційні методи (наприклад, лиття під тиском із виготовленням штампа) здатні знизити собівартість до 1–3\$ за модель. Проте високі початкові вкладення виправдовуються лише за стабільного і великому обсягу замовлень.

Якщо необхідні спеціальні вимоги до якості тактильного рельєфного шрифту Брайля або критично висока деталізація (чітке відтворення шрифту Брайля, дрібні

елементи), можна розглянути SLA/DLP або PolyJet. Проте їхня собівартість (20–40\$ за модель) вища, і вони виправдані в проєктах, де якість безпосередньо впливає на функціональність.

Якщо необхідний компроміс між якістю та вартістю, технологія SLS може забезпечити хорошу якість та механічну міцність без надто високої собівартості за умови правильної організації виробництва. Найчастіше вона застосовується у невеликих партіях або для об'єктів, що потребують специфічних матеріалів.

Економічно вигідним рішенням для невеликої кількості прототипів та персоналізованих моделей є 3D-друк методом FDM-FFF. Собівартість однієї моделі може становити близько 5–7\$, що робить цей метод оптимальним для прототипування, освітніх програм або спеціалізованих замовлень для незрячих людей.

Отже, вибір технології залежить від:

- обсягів виробництва: дрібносерійне виробництво – 3D-друк; масове – традиційні методи;
- вимог до деталізації і якості тактильного сприйняття: використовують технології з більш високою роздільною здатністю (SLA-DLP, PolyJet);
- гнучкості та можливості швидкого коригування дизайну: 3D-друк має суттєву перевагу – потребує меншої площі, дає змогу створювати прототипи на етапі цифрового моделювання та тестувати їх перед запуском масового виробництва.

Таким чином, якщо проєкт орієнтований на швидке виготовлення індивідуальних або малосерійних тактильних моделей зі шрифтом Брайля, то сучасні технології 3D-моделювання та друку (особливо FDM/FFF) є найбільш економічно ефективним і гнучким рішенням. У разі масового виробництва традиційні методи можуть знизити собівартість, проте потребують великого обсягу замовлення та значних інвестицій для виправдання витрат на підготовку виробництва.

1. Підсумовуючи проведений аналіз, можна дійти до висновку що адитивне виробництво специфічні характеристики, які відрізняють його від традиційних методів виробництва у процесі створення брайлівських тактильних моделей. Ключові переваги адитивного виробництва: 1) адитивний підхід – матеріал додається шарами, що мінімізує відходи й забезпечує точний контроль форми; 2) висока точність – сучасні технології 3D-друку, такі як SLA-DLP, PolyJet, досягають високої точності з роздільною здатністю до кількох мікронів; 3) гладкість поверхонь – PolyJet, SLA-DLP забезпечують високу гладкість поверхні без необхідності додаткової постобробки; 4) різноманітність матеріалів – можливість друку з використанням різних матеріалів, включаючи фотополімери, метали, біо- та композитні матеріали; 5) гібридні структури – можливість створення деталей зі змінною щільністю й багатошаровою структурою для покращення механічних характеристик; 6) підтримка складних форм – створення складних та інтегрованих конструкцій із внутрішніми порожнинами, підтримками й порожнечами без додаткових витрат [72]; локалізоване виробництво – можливість розміщення виробництва безпосередньо поруч із місцем використання, що зменшує логістичні витрати; 7) інкрементальні зміни – швидке внесення змін у дизайн та повторний друк без необхідності складних і дорогих переналаштувань виробничих ліній; 8) гнучкість модифікації – можливість швидко модифікувати виріб на етапі дизайну, покращуючи чи додаючи нові функції перед фінальною версією; 9) біосумісність – можливість створення виробів із біорозкладних і біосумісних матеріалів, екологічно безпечних для людей та довкілля; 10) функціональні прототипи – прототипи можуть візуалізувати продукт, та бути функціональними, що спрощує тестування і оцінку якості; 11) прямий друк металів – технології DMLS та EBM забезпечують друк металевих деталей із високою міцністю та складною геометрією; 12) екологічна стійкість –

мінімізація відходів і можливість повторного використання матеріалів робить технологію більш сталим рішенням, 3D-друк може стати більш екологічно стійким методом виробництва; 13) друк великогабаритних об'єктів – промислові 3D-принтери дозволяють виготовляти великі деталі та конструкції, що не завжди можливо з використанням традиційних методів.

У науковому дослідженні було обрано технологію адитивного виробництва для створення тактильних брайлівських моделей, за можливості відмовившись від використання традиційного виробництва. Представимо результати порівняння між адитивним і традиційним виробництвом:

- Виробничі витрати. Традиційні методи потребують високих початкових витрат через необхідність виготовлення форм і пресів. Натомість 3D-друк передбачає низькі початкові витрати, особливо для малих партій.
- Швидкість запуску. У традиційному виробництві запуск триває довше через створення форм і підготовчі етапи. 3D-друк дозволяє оперативно розпочати виробництво без додаткових підготовчих процесів.
- Матеріали. Традиційні методи обмежені матеріалами для кожного процесу. 3D-друк забезпечує широкий вибір матеріалів, які можна адаптувати до процесів.
- Геометрична складність. У традиційних методах обмежена типом обладнання й форм, а технологія 3D-друку дає необмежені можливості для створення складних форм.
- Гнучкість у дизайні. Традиційні методи – дорогівартісні для внесення змін. 3D-друк – швидкість і доступність внесення змін
- Масове виробництво. Традиційні методи ефективні для великих серій. 3D-друк оптимальний для індивідуальних замовлень і дрібносерійного виробництва.
- Висока точність і деталізація. Хоча деякі традиційні методи дозволяють

виготовляти деталізовані брайлівські моделі, це потребує додаткових ресурсів та зусиль. А сучасні технології 3D-друку, такі як SLA, DLP або SLS, можуть забезпечувати високоточні та деталізовані моделі з мінімальними відхиленнями від стандартів Брайля [73].

- Оптимізація геометрії. Для створення певних форм необхідно використовувати різні технології традиційних методів, що зумовлює додаткові витрати і зусилля. Технологія 3D-друку дає змогу створювати різні форми крапок (опуклі, увігнуті) залежно від потреб користувача чи специфіки читання шрифту Брайля.

Адитивне виробництво надає можливість створювати різноманітні та більш складні моделі та прототипи. Зокрема можливий друк багатобарвних або багатофункціональних моделей із використанням кількох типів матеріалів в одному процесі. Це дозволяє забезпечити чітке розрізнення між крапками Брайля та поверхнею, що полегшує розпізнавання. Крім того, є можливість друку простих тактильних 3D-моделей, а також можливість комбінувати тактильні та візуальні елементи, створюючи гібридні моделі з тактильними елементами (для незрячих) і візуальні елементи. Додатково є можливість впровадження елементів електроніки, зокрема сенсорів, які можуть реагувати на дотик до крапок Брайля.

На основі проведеного аналізу технології адитивного виробництва встановлено, що:

- Адитивне виробництво має переваги над традиційними методами виробництва, дозволяючи швидко і якісно створювати тактильні моделі з мінімальними фінансовими витратами, з мінімальним забрудненням довкілля, без потреби у виготовленні додаткових спеціальних форм і дорогого обладнання. Уже та на етапі цифрового моделювання можна виявляти та виправляти недоліки в моделях.
- Технології 3D-друку DLP, SLA є оптимальними для створення брайлівських 3D-моделей, оскільки ці забезпечують високу якість та деталізацію

тактильних моделей, відзначаються високою міцністю і надійністю, можуть застосовуватись для масового виробництва та в екстремальному середовищі, проте такі технології є фінансово витратними. Тоді як FDM-FFF друк є економічно вигідним, може використовуватись для індивідуальних потреб, але має середню якість брайлівських моделей.

У дослідженні проаналізовано принципи формування шрифту Брайля на 3D-моделях у процесах адитивного виробництва та вплив технологій на якість тактильних моделей. Підтверджено, що вибір технології адитивного виробництва впливає на точність і розбірливість 3D-друкованих моделей Брайля [94].

2.3 Дослідження процесів роботи 3D-принтерів. Фактори впливу та ідентифікація пріоритетних механізмів

Процес адитивного виробництва починається зі створення цифрового 3D-прототипу за допомогою систем САПР або сканера. Після цього модель імпортується в слайсер у форматах STL, OBJ або інших форматах, які сумісні з програмним забезпеченням, що використовується 3D-принтером. Це програмне забезпечення відіграє вирішальну роль у роботі 3D-принтера, оскільки не лише надсилає інструкції на принтер через бездротове або кабельне з'єднання, а й дозволяє регулювати різні параметри друку. Зокрема йдеться про орієнтацію друку на друкарській поверхні, необхідні структурні опори, висоту кожного шару та вибір матеріалу [74].

Отже, розглянемо робочі механізми 3D-принтера і їх компоненти:

1. Стіл або платформа (поверхня 3D-друку) – поверхня, на якій друкується модель. Вона може нагріватися для покращення адгезії моделі до поверхні. У випадку створення моделей із текстом Брайля нерівність або неправильне калібрування платформи можуть спричинити спотворення перших шарів, які є основою для всієї моделі. Для шрифту Брайля це означає, що рельєфні крапки

будуть розміщені нерівномірно або з відхиленням у висоті [89]. Температура платформи також є важливим чинником, що може вплинути на стискання, осідання, зменшення об'єму матеріалу через охолодження: надмірно висока температура може призвести до деформації моделі, тоді як занадто низька – до недостатньої адгезії першого шару, що негативно вплине на чіткість крапок [75–77].

2. Екструдер – компонент принтера, який подає нитку (філамент) у нагрівальний блок, де матеріал плавиться та видавлюється на платформу для формування шару. Швидкість подачі філамента впливає на консистенцію крапок: завелика швидкість спричиняє переповнення пластику та спотворення крапок, замала – до неповних точок. Температура нагрівання філамента в екструдері має бути строго контрольованою: недостатнє нагрівання призведе до нерівномірної екструзії, а перегрів – до деформації крапок Брайля [75–79].

3. Hot End (нагрівальний блок) – частина екструдера, у якій ниткоподібний матеріал плавиться до стану, що дозволяє видавлювати його через сопло. Температура плавлення матеріалу впливає на якість моделі. Для друку точок шрифтом Брайля важливо забезпечити стабільну температуру, оскільки її коливання можуть призвести до відмінностей у розмірах і висоті точок, що негативно позначиться на тактильному сприйнятті. Матеріали з різними температурами плавлення також характеризуються різним ступенем стискання під час охолодження, що може вплинути на точність розташування крапок Брайля.

4. Сопло – елемент, усередині якого відбувається нагрівання й розплавлення пластику до рідкого стану, після чого він видавлюється через калібрований отвір на поверхню для друку. Діаметр сопла безпосередньо впливає на розмір друку мінімальних деталей. Для друку шрифту Брайля потрібна висока точність, щоб забезпечити правильний рельєф крапок. Щодо дрібних деталей: для крапок Брайля важливо, щоб їх діаметр був досить малим і відповідав стандартам. Якщо сопло занадто велике (наприклад, 0.8 мм), це може призвести до неточної форми крапок або їх злиття. Оптимальне сопло: для шрифту Брайля зазвичай використовують

сопла діаметром 0,2–0,4 мм, що дає змогу досягти достатньої точності кожної крапки. Додатковими факторами є товщина шару та деталізація рельєфу. Товщина шару – це висота, на яку накладається кожен шар пластику. При більшому діаметрі сопла та товстіших шарах (наприклад, 0,3–0,4 мм) може знижуватися роздільна здатність за висотою, що впливає на точність рельєфних крапок. Для моделі Брайля рекомендують товщину шару 0,1–0,2 мм, щоб отримати чіткі й точні крапки. Якщо шари будуть товстішими, крапки можуть втрачати точність і висоту. Іншим важливим фактором є матеріал сопла. Якщо сопло виготовлене з невідповідного або неякісного металу, воно може швидко зношуватися під час роботи з абразивними матеріалами, що знижує точність друку і негативно впливає на моделі Брайля. Латунні сопла найпопулярніші, але при друкуванні з абразивними філаментами (наприклад, з вуглецевими волокнами) можуть швидко зношуватися. Нерівномірна подача матеріалу через сопло (через засмічення, перегрівання або неправильне калібрування) також може призвести до дефектів у моделі, особливо в друці крапок Брайля. Важливо, щоб сопло забезпечувало рівномірну екструзію [75–79].

Отже, конфігурація сопла може покращити або погіршити друк шрифту Брайля:

- Покращення: за правильно підібраного діаметра сопла та товщини шару модель Брайля буде надрукована із чіткими крапками, які добре виділятимуться на моделі.
- Погіршення: якщо сопло занадто велике або якість екструзії низька, то крапки Брайля можуть зливатись або розмазуватись, що зробить текст на дотик нечитабельним.

5. Охолоджувальний вентилятор – охолоджує нитку після її екструдювання, забезпечуючи належне затвердіння. Вентилятори охолодження забезпечують рівномірне охолодження матеріалу після його екструзії, що впливає на форму та структуру моделі. Якщо охолодження відбувається занадто швидко, це може

спричинити стискання матеріалу, і крапки Брайля можуть стати надто малими. Недостатнє охолодження може призвести до того, що матеріал залишається м'яким довше, і форма точок крапок Брайля може деформуватися.

6. Плата управління керування – електронний компонент, який керує роботою принтера.

7. Блок живлення – забезпечує живлення всіх компонентів принтера.

8. Котушка для нитки – утримує нитку, яка подається в екструдер.

9. Інтерфейс користувача – екран й елементи керування, за допомогою яких здійснюється взаємодія з принтером.

10. Механізми руху (Axes Movement Systems – крокові двигуни) – відповідають за переміщення друкарської станини та екструдера по осях X, Y та Z. Принтер використовує крокові двигуни для переміщення екструдера та платформи по осях X, Y та Z. Кожна із цих осей відповідає за певні напрямки руху. Осі X і Y забезпечують горизонтальне переміщення екструдера, формуючи контури кожного шару. Вісь Z контролює висоту шару і підіймає/опускає платформу відповідно до заданої товщини шару.

11. Контролер принтера (Printer Controller) – центральний модуль управління 3D-принтером, який координує рух, температуру та подачу матеріалу. Від точності керування цими параметрами залежить якість надрукованої моделі.

12. Upload Materials (Material/Filaament). Філамент – це пластик, який використовують для створення 3D-моделі. Є різні типи філаментів: PLA, ABS, PETG та інші, кожен із яких має свої характеристики. PLA (полілактид) – найпоширеніший матеріал для 3D-друку завдяки простоті у використанні та гарній деталізації, що особливо важливо для друку дрібних елементів, як-от крапки шрифту Брайля. Однак PLA може бути крихким, тому дрібні крапки можуть ламатися при тривалому використанні. ABS (акрилонітрилбутадієнстирол) – міцніший матеріал, але вимагає контролю температури платформи й нагрівача, оскільки при неправильній температурі може деформуватися або зазнавати

стискання. Параметри стискання матеріалу слід враховувати під час проєктування шрифту Брайля, щоб після охолодження розміри точок і відстані між ними відповідали стандартам.

13. Калібрування (Calibration) – процес налаштування положення сопла щодо платформи, налаштування осей і точність подачі філаменту. Неправильне калібрування осі Z призведе до того, що перший шар (а отже, і вся модель) буде надто близько або надто далеко від платформи. Для моделей із шрифтом Брайля це критично, оскільки крапки мають бути однаковими за висотою й точністю розташування. Калібрування екструдера впливає на точність подачі матеріалу. Якщо екструдер подає занадто багато або занадто мало матеріалу, це позначиться на розмірі та формі крапок.

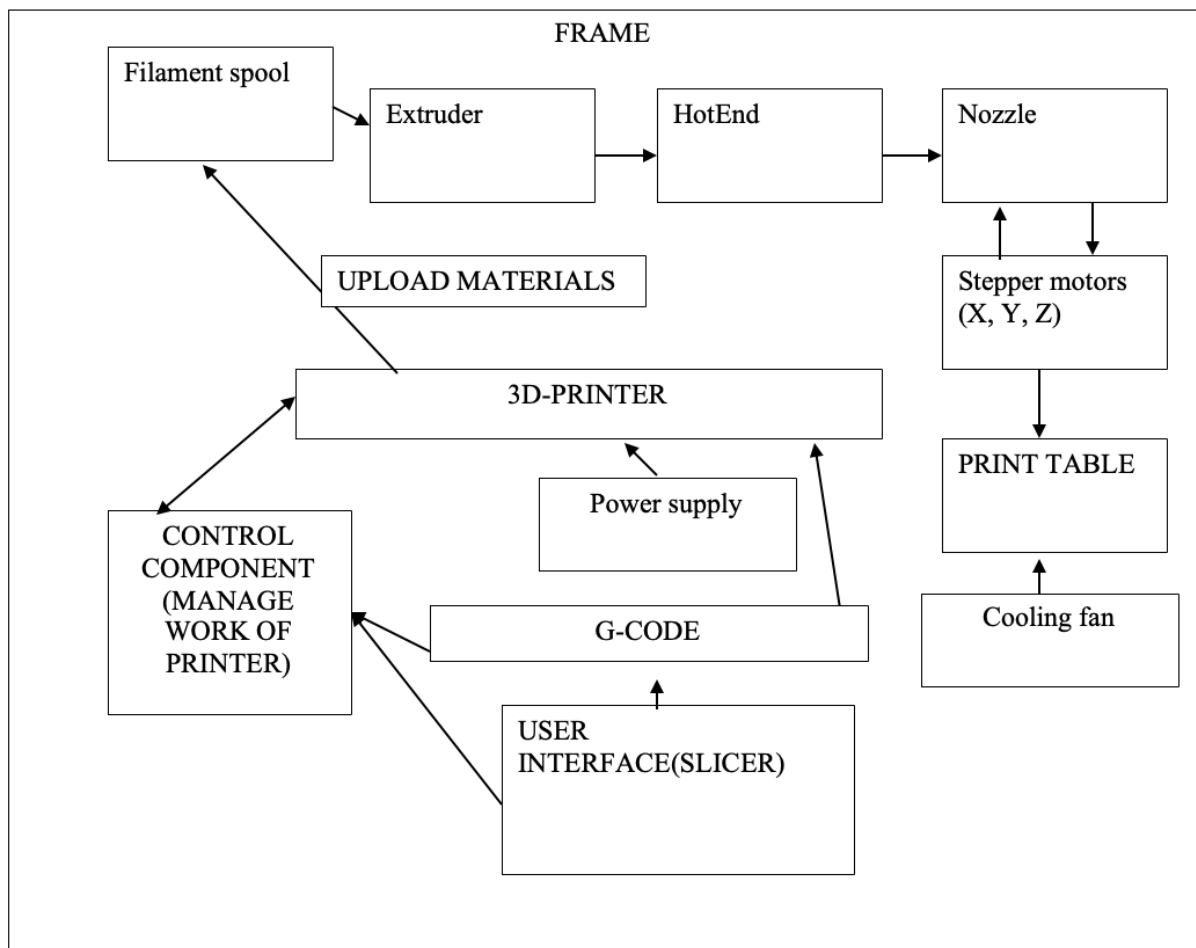


Рис. 2.3.1. Схема робочих механізмів 3D-принтера

Розглянемо принцип роботи 3D-принтерів (рис 2.3.1):

- Моделювання плавленого осадження (FDM): передбачає нагрівання й екструдювання термопластичної нитки, яка наноситься шар за шаром. Цю технологію часто використовують для створення прототипів моделей шрифту Брайля.
- Стереолітографія (SLA): використовує лазер для затвердіння рідкої смоли в затверділий пластик. SLA відзначається високою точністю, що робить його придатним для дрібних елементів, зокрема крапок Брайля.
- Селективне лазерне спікання (SLS): використовує лазери для спікання порошкоподібного матеріалу. Ця технологія дозволяє отримати технологія міцні та довговічні моделі, придатні для шрифту Брайля, але точність може змінюватись залежно від матеріалу та роздільної здатності шару.
- Цифрова світлова обробка (DLP): подібна до SLA, однак використовує проєктор для затвердіння смоли, що забезпечує швидший пошаровий друк.

Для тактильного зчитування інформації, а саме крапок Брайля, необхідно забезпечити мінімальний розмір елемента, який відповідає тактильній чутливості кінчиків пальців людини. Мінімальний розмір елемента (MFS) у 3D-друку стосується найдрібніших деталей, які можна точно надрукувати, і залежить від роздільної здатності принтера. Для цього запишемо математичний вираз (для технологій SLA/FDM):

$$MFS = \frac{ND}{LH} \times PT \quad (2.3.1)$$

де MFS – мінімальний розмір функції механізму, ND – діаметр сопла, LH – висота шару, PT – допуск 3D-принтера.

Розглянемо приклад: 3D-принтер FDM має діаметр сопла 0,5 мм, висоту шару

– 0,1 мм, а допуск принтера – 0,05 мм. У такому випадку MFS буде становити 0,025 мм, що є достатньо великим, щоб підтримувати необхідну точність крапок при формуванні тексту шрифтом Брайля на прототипах. Базуючись на загальнодоступних технічних характеристиках, подаємо порівняльну таблицю 2.3.1.

Таблиця 2.3.1

Тип 3D-друку і його фактори впливу

ТИП 3D-ДРУКУ	ФАКТОР ВПЛИВУ	ТОВЩИНА ШАРУ	Min & Max FS
FDM/FFF	Діаметр сопла; товщина шару; точність позицій екструдера	0.1–0.3 мм	0.2–0.4 мм; 0.8–1.2 мм
SLA	Роздільна здатність; матеріали; налаштування принтера	0.025–0.1 мм	0.025 мм; від 0.1 мм до 0.15 мм
SLS	Розмір лазера; товщина шару; порошкові матеріали	0,06-0,15 мм	0,1-0,2 мм; > 0,5 мм.
DLP	Роздільна здатність проєктора; товщина шару; точність фотополімеризації смол	від 0.025 мм до 0.1 мм	0.025–0.05 мм; 0.1–0.15 мм.
PolyJet	Якість матеріалу; налаштування принтера	від 0.014 до 0.032 мм	0.014–0.032 мм > 0.2 мм

Ідентифікація особливо критичних механізмів і компонентів. Для визначення пріоритетних механізмів у роботі 3D-принтера скористаємося відповідним математичним виразом:

$$P = \alpha \cdot C + \beta \cdot O + \eta \cdot F + \pi \cdot S \quad (2.3.2)$$

де: P – пріоритет; α, β, η, π – вагові коефіцієнти, які визначаються на основі пріоритетних факторів (механізмів); C – механізм; O – частота використання компонента 3D-принтера; F – імовірність відмови механізму; S – вартість механізму (частини 3D-принтера).

Для ідентифікації важливих механізмів та частин 3D-принтера, які впливають на якість створення 3D-моделей і формування шрифту Брайля, застосуємо методи нечіткої логіки. Використовуючи нечітку логіку, можна отримати результати, наближені до точних, з урахуванням невизначеності параметрів окремих компонентів.

Визначимо початкові кроки для ідентифікації факторів (механізмів принтера), які найбільше впливають на створення тактильних моделей:

- Сопло (nozzle): діаметр сопла, товщина шару, рівномірність подачі матеріалу.
- Екструдер (extruder): подача та плавлення матеріалу, стабільність температури.
- Платформа друку (bed): площинність та адгезія матеріалу.
- Механізми руху (осі X, Y, Z): точність переміщення, коливання, роздільна здатність.
- Контролер (firmware): параметри калібрування, налаштування швидкості та точності.

На першому етапі було визначено механізми, що найбільше впливають на якість 3D-моделей. Для проведення ідентифікації необхідно виконати другу ітерацію – визначити параметри, які впливають на якість друку:

- точність друку (наприклад, висота та радіус крапки Брайля);
- чіткість рельєфу (якість поверхні);
- швидкість друку (яка безпосередньо пов'язана з точністю);
- стабільність екструзії (рівномірність подачі матеріалу до створення рельєфних точок);
- теплові характеристики (важливо уникнути перегріву або недостатньої температури матеріалу).

Третя ітерація – використаємо нечітку логіку з такими універсальними лінгвістичними значеннями: 0, 1, 2, де 0 – мінімальний рівень; 1 – середній; 2 –

максимальний. Для кожного механізму (фактора) встановлюється функція належності.

1. Сопло (nozzle)

- Діаметр сопла. Діаметр сопла визначає мінімальний розмір деталі та точність друку крапок Брайля. Діапазон стандартних значень (V): від 0.2 мм до 1.0 мм.

Отже, візьмемо будь-яке значення для визначення лінгвістичної змінної (високий – 2), а значення V_2 – коливається від 0,6 до 1.0 мм.

$$\eta_2(x) = \begin{cases} 1, & x \leq V_0 \\ 1 - \frac{x - V_0}{V_0}, & V_0 < x < V_2 \\ 0, & x > V_2 \end{cases} \quad (2.3.3)$$

- Товщина шару. Товщина шару впливає на вертикальну роздільну здатність і точність висоти точок Брайля. Діапазон стандартних значень (V): від 0.05 мм до 0.3 мм. Функція належності отримає такий вигляд: для η_2 – високий та η_1 – середній :

$$\eta_2(x) = \begin{cases} 1, & x \leq 0,1 \\ 1 - \frac{x - 0,1}{0,05}, & 0,1 < x < 0,15 \\ 0, & x > 0,15 \end{cases} \quad (2.3.4)$$

$$\eta_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0,1 \\ \frac{x - 0,2}{0,2}, & 0,2 < x < 0,4 \\ 1 - \frac{x - 0,4}{0,2}, & 0,4 < x < 0,6 \\ 1, & x > 0,6 \end{cases}$$

- Рівномірність подачі матеріалу. Визначає стабільність подачі матеріалу, що впливає на якість точок Брайля. Для потоку, що стабільно подається, матеріал вважається «високим», при значних коливаннях подачі –

«низьким». Діапазон стандартних значень (V): від 0 до 1 (де 1 – ідеальна рівномірність, 0, 5 – середня, 0 – дуже нестабільна подача).

2. Екструдер:

- Подача матеріалу. Стабільна подача матеріалу є важливою для точного формування рельєфу крапок Брайля. Наприклад, «плавна» подача для постійної екструзії без стрибків і зупинок.

Лінгвістичні змінні для визначення фактора подачі матеріалу, визначається як: «плавна», «середня», «нестабільна». Діапазон значень встановлено від 0 до 1.

- Стабільність температури. Важлива для точного плавлення філамента та формування деталей моделі шрифтом Брайля. Стабільна температура під час друку на рівні 210°C для PLA вважається «високою».

3. Платформа друку:

- Площинність – це платформа рівність платформи, яка впливає на адгезію і якість нижніх шарів точок Брайля. Має лінгвістичні значення: «ідеальна», «середня», «погана». Наприклад, якщо відхилення площини не перевищує 0,1 мм, таку поверхню можна вважати «ідеальною».
- Адгезія матеріалу впливає на фіксацію перших шарів та точок Брайля на платформі. Для неї використовуються лінгвістичні значення: «висока», «середня», «низька». Діапазон значень коливається від 0 до 1. Наприклад, використання клейких покриттів або підкладок для друку вважається високою адгезією, що відповідає значенню 1.

4. Механізми руху (X, Y, Z осі):

- Точність переміщення. Точність осей впливає на чіткість формування рельєфу точок Брайля. Діапазон значень від 1 до 0. Якщо відхилення механізму руху менше ніж 0.05 мм, це означає «висока точність».
- Коливання. Коливання осей можуть спотворювати крапки Брайля. Лінгвістичні значення: «малі», «середні», «великі». Вібращії з амплітудою менше 0,1 мм вважаються «малими».

- Допуск. Кількість кроків двигуна на одиницю руху впливає на точність друку. Лінгвістичні значення: «високе», «середнє», «низьке». Роздільна здатність осі по XY 100 мікронів вважається «високою».

5. Контролер (Firmware):

- Параметри калібрування. Контролюють подачу матеріалу та рух осей, що впливає на точність формування моделі Брайля. Лінгвістичні значення: «точні», «середні», «некоректні». Якщо відхилення під час калібрування становить менше на 0.01 0,01 мм, воно вважається «ідеальним».
- Налаштування швидкості. Швидкість друку може впливати на точність рельєфу точок Брайля. Лінгвістичні значення: «оптимальна», «середня», «швидка». Оптимальна швидкість для якісного друку деталей Брайля – 40–60 мм/с.
- Точність. Точне налаштування параметрів друку є важливою умовою для якісного створення моделі Брайля. Лінгвістичні значення: «висока», «середня», «низька». Приклад: якщо похибка друку становить менше ніж 0,05 мм, точність вважається «високою».

Згідно з проведеним аналізом отримано результати, де кожен механізм 3D-принтера описано за допомогою лінгвістичних змінних, які відображають його вплив на кінцеву якість шрифту Брайля [89]. Методи функцій належності можуть застосовуватися для різних механізмів 3D-принтерів. Ці змінні дозволяють побудувати систему правил на основі нечіткої логіки, щоб оцінити та оптимізувати точність друку рельєфних крапок Брайля. У результаті визначено основні фактори 3D-принтерів, які впливають на якість формування шрифту Брайля.

2.4 Вплив матеріалів для 3D-друку на формування шрифту Брайля для якісного тактильного сприйняття

Вибір матеріалів є ключовим фактором, який впливає на якість формування шрифту Брайля в 3D-моделях. Від вибору матеріалу залежить вибір технології 3D-

друку, типу 3D-принтера, слайсерів, а також способу створення тривимірних моделей у системах CAD/CAM [80]. Для того, щоб обрати оптимальний матеріал для друку моделей зі шрифтом Брайля, необхідно проаналізувати властивості матеріалів, визначити їхні переваги й недоліки, вплив на якість відтворення тексту шрифтом Брайля [81]. На основі наявних даних побудовано таблицю 2.4.1, у якій наведено порівняння матеріалів для 3D-друку, їхніх переваг, недоліків і впливу на якість рельєфу. Це порівняння створює фундамент для подальших наукових досліджень і дозволяє підтвердити чи спростувати наявні факти.

Таблиця 2.4.1

Аналіз типів матеріалів для 3D-друку, їх вплив на якість та переваги

Тип матеріалу	Вплив на якість шрифту Брайля	Переваги	Недоліки
ABS-plastic (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	Хороша довговічність; зазвичай використовується	Висока ударостійкість	Обмежена гнучкість; може бути крихким
PLA-plastic (Polylactic Acid)	Біорозкладний; Широка доступність	Екологічно чистий	Низька стійкість до ударів
Nylon	Гнучкий та довговічний	Висока гнучкість	Обмежена жорсткість
Resin (SLA/ DLP)	Висока точність та висока гладкість поверхні	Відтворення деталей на достатньо високому рівні	Чутливість до УФ-світла
PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)	Висока міцність. Стійкий до хімічних речовин	Можливість використовувати прозорі варіанти	Обмежена гнучкість
Фотополімери, еластичні полімери, комбіновані полімери	Висока точність, чіткість та гладкість точок, ідеальні для шрифту Брайля. Еластичні – менш чіткі крапки через м'якість, підходять тактильного сприйняття, комбіновані – поєднують жорсткі та еластичні власт. для унікальних рішень	Висока деталізація, гладка поверхня, кольоровий друк, гнучкість, створення багатофункціональних моделей	Крихкий, менш довговічний, висока вартість

Типи матеріалів:

Термопласти (PLA, ABS, PETG): *PLA (полімолочна кислота)*: PLA широко використовується в 3D-друку завдяки простоті у використанні та низькому рівню викривлення, що робить його ідеальним для друку точних крапок шрифту Брайля. Однак він є більш крихкий порівняно з іншими пластиками, які можуть бути непридатними для інтенсивного використання. *ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол)*: ABS є більш міцним, ніж PLA, але має вищу стискання, що може призвести до викривлення або деформації крапок Брайля. Належне калібрування принтера та адгезія платформи є важливими для підтримки точності шрифту Брайля. *PETG (поліетилентерефталат гліколь)*: PETG поєднує довговічність ABS із легкістю друку, як у PLA. Завдяки своїй гнучкості та мінімальному викривленню він є вдалим вибором для моделей зі шрифтом Брайля, які потребують тривалого використання [82].

Гнучкі матеріали (TPU, TPE): ці матеріали є гнучкими та пружними, що робить їх придатними для моделей зі шрифтом Брайля, які потребують м'яких поверхонь. Однак їх гнучкість впливати на чіткість і довговічність крапок Брайля, що вимагає ретельного калібрування [82].

Смоли (SLA/DLP): смоли, які використовуються в стереолітографії (SLA) або цифровій обробці світла (DLP), забезпечують високу точність і гладкість поверхонь, що сприяє формуванню крапок Брайля. Однак полімерні моделі часто є більш крихкими і можуть швидше зношуватися при тактильному використанні. У SLA (стереолітографії) смоли поділяють на три категорії за гнучкістю: жорсткі, середні та гнучкі. Цей поділ заснований на їхніх механічних властивостях, таких як модуль пружності, міцність та еластичність [82]. *Жорсткі смоли*. Властивості: висока жорсткість, низька гнучкість. Ці матеріали мають високу міцність щодо розтягування та стисків: *Standard Resin* (стандартна смола) – для створення деталей із високою точністю, але без гнучкості. *Rigid Resin* (жорстка смола) – посилена

скловолокном, для жорстких та міцних об'єктів. *High Temp Resin* (високотемпературна смола) – витримує високі температури, підходить для термостійких компонентів. Застосування: корпуси, інструментальні деталі, точні моделі. **Середньо-гнучкі смоли.** Властивості: помірна гнучкість, баланс між міцністю та пластичністю. *Tough Resin* (ударостійка смола) – витримує механічні навантаження та деформації без руйнування. *Durable Resin* (зносостійка смола) – має гладку поверхню і добру гнучкість, підходить для частин, що рухаються. Застосування: прототипи функціональних деталей, моделі, що імітують ABS або інші пластики, вироби з помірною гнучкістю. **Гнучкі смоли.** Висока еластичність, схожі на гуму або м'який пластик. Приклади: *Flexible Resin* (гнучка смола) – для деталей, які потребують стиснення, розтягування та згину. *Elastic Resin* (еластична смола) м'якша, із низьким модулем пружності, підходить для моделей, що нагадують силікон. Застосування: ущільнювачі, м'які вставки, прототипи одягу, медичні вироби (наприклад, ортопедичні пристрої). Кожен тип смоли має унікальні характеристики, придатні для різних завдань. Наприклад: 1) жорсткі смоли краще підходять для статичних деталей, що несуть навантаження; 2) середньо-гнучкі – для функціональних прототипів; 3) гнучкі – для м'яких та динамічних компонентів.

PolyJet матеріали: фотополімери забезпечують чіткі та гладкі крапки, що важливо для формування шрифту Брайля. Однак їх крихкість може стати недоліком при тривалому використанні. **Еластичні фотополімери** мають гнучкість, але їхня м'якість може знижувати чіткість точок шрифту, що робить їх менш придатними для стандартних брайлівських моделей. **Комбіновані матеріали** дозволяють створювати моделі, у яких різні властивості матеріалу застосовуються у різних частинах виробу, але це збільшує вартість та складність процесу друку.

Довговічність матеріалу: довговічність матеріалу має вирішальне значення, особливо якщо модель Брайля призначена для частого використання. Такі матеріали, як ABS, SLA, DLP або PETG, краще підходять для тривалого застосування, оскільки вони менш схильні до руйнування або деформації під

тиском [83]. Твердість і стійкість до ударів також важливі, оскільки надто м'які або крихкі матеріали можуть із часом призвести до сплюснення крапок Брайля, що зменшить їхню тактильну ефективність [83].

Адгезія шару і якість друку: адгезія між шарами впливає на міцність крапок Брайля. Погана адгезія між шарами може призвести до відшарування або відламування крапок. Такі матеріали, як PLA і PETG, демонструють міцну міжшарову адгезію, що сприяє збереженню цілісності елементів Брайля [83]. Оздоблення поверхні: матеріали, які використовують для друку SLA, наприклад смоли, створюють гладкі поверхні, які покращують тактильну читабельність крапок Брайля. Натомість матеріали з грубшою текстурою можуть ускладнювати розпізнавання випуклих або втоплених крапок Брайля, що знижує чіткість і читабельність тексту Брайля для незрячих людей.

Термостійкість: важлива в середовищах із перепадами температури. Такі матеріали, як ABS і PETG, можуть витримувати вищі температури, тому підходять для зовнішнього застосування, де модель Брайля може зазнавати впливу сонячного світла або тепла. PLA, з іншого боку, має нижчу температуру плавлення і може деформуватися під впливом високих температур [83].

Гнучкість і тактильний зворотний зв'язок: гнучкі матеріали, як-от TPU, забезпечують приємне тактильне відчуття завдяки м'якості, що є перевагою для людей із чутливою шкірою. Однак надмірна гнучкість ускладнює точне сприйняття крапок Брайля. Для оптимального тактильного сприйняття необхідний баланс між гнучкістю та жорсткістю матеріалу [83].

Точність: усадка, зменшення об'єму матеріалу під час охолодження або затвердіння впливає на точність формування крапок Брайля. Термопластики, такі як ABS і PLA, можуть дещо стискатися, що може спотворювати шрифт Брайля. Натомість процеси друку на основі смоли забезпечують вищу точність із стискання мінімальною деформацією, хоча такі моделі можуть бути менш довговічними для інтенсивного щоденного використання [83].

Вартість і доступність: вибір матеріалу також впливає на вартість виготовлення моделей шрифтом Брайля. PLA є недорогим і доступним, що робить його для масового виробництва навчальних матеріалів або табличок шрифтом Брайля. Смола, хоча й дорожча, але забезпечує вищу точність, є важливою перевагою для певних застосувань, наприклад, для застосування в громадських місцях [83].

Проведений аналіз вказує на фактори, які впливають на вибір матеріалів для 3D-друку, їхні властивості, а також на формування шрифту Брайля. Оскільки цього аналізу недостатньо для остаточного вибору матеріалу, необхідно визначити лінгвістичні змінні: MIN, MAX, AVERAGE.

2.1 Властивості матеріалу

Ключові властивості матеріалів, які впливають на якість моделі Брайля:

- міцність (D)
- гнучкість (F)
- точність (P)
- вартість (C)

2.2 Характеристики моделі Брайля

Характеристики моделей Брайля, на які впливає матеріал:

- чіткість крапок (DP): чіткість окремих точок для тактильного розпізнавання.
- тактильний зворотний зв'язок (TF): наскільки легко користувачі можуть сприймати та розрізняти крапки Брайля.
- довговічність (BD): довговічність моделі Брайля під час частого використання або впливу навколишнього середовища.

Для чіткого визначення кожної властивості матеріалів, а також характеристик моделей Брайля, необхідно описати їх у вигляді математичного виразу, а саме – трикутної функції належності.

$$f_{(D,F,P,C,DP,TF,BD)} = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq a \wedge x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{if } b < x < c \end{cases}, \quad (2.4.1)$$

А саме:

$$f_{(D,F,P,S,DP,TF,BD)} = \text{MAX}(\text{MIN}\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0) \quad (2.4.2)$$

abc – визначає форму трикутника для низьких, середніх і високих значень. Допустимо, що властивість матеріалу D (міцність) має коефіцієнти від 0 до 1. Використовуючи формулу 2.4.1, отримуємо такі результати:

- Низький ($a=0, b=0,1, c=0,3$)
- Середній ($a=0,4, b=0,5, c=0,6, c=0,7$)
- Високий ($a=0,8, b=0,9, c=1,0$).

Для розрахунку інших властивостей, таких як DP, BD, TF, F, P, C, використовується формула 2.4.1. На основі цієї формули можна визначати, як властивості матеріали та моделі Брайля впливають на якість брайлівських тактильних моделей, створений у процесах адитивного виробництва. Однак є й інший аспект, – взаємозалежність властивостей, і необхідно визначити, як одна властивість впливає на іншу У такому випадку застосовуються методи нечіткої логіки (Fuzzy Logic), які дозволяють описати властивості матеріалів і їх вплив на характеристики брайлівських 3D-моделей.

- IF Міцність Висока || Гнучкість Низька || Точність висока, THEN Чіткість крапок висока || Тактильний зворотний зв'язок Високий || Міцність Висока.
- IF Міцність Середня || Гнучкість Висока, THEN Чіткість крапок Середня || Тактильний зворотний зв'язок Середній.
- IF Міцність Низька || Точність Низька, THEN Чіткість крапки низька ||

Тактильний зворотний зв'язок Низький || Довговічність Низька.

Для узагальнення властивостей матеріалів і їх впливу на характеристики шрифту Брайля опишемо їх наступним чином:

- IF Властивості матеріалів (Стійкість, Гнучкість, Точність – висока)
THEN Якість моделі Брайля (Чіткість крапок, Тактильний зворотний зв'язок, Міцність – висока).
- IF Властивості матеріалів (Стійкість, Гнучкість, Точність – середня)
THEN Якість моделі Брайля (Чіткість крапок, Тактильний зворотний зв'язок, Міцність – середня).
- IF Властивості матеріалів (Стійкість, Гнучкість, Точність Низька)
THEN Якість моделі Брайля (Чіткість крапок, Тактильний зворотний зв'язок, Міцність – низька).

Оскільки опис властивостей та характеристик є лише нечіткими даними, для отримання чітких значень використаємо вихідні типу Мамдані для оцінювання результату на основі нечітких правил. Для кожного правила ступінь істинності обчислюється на основі функцій належності вхідних змінних (D, F, P, C). Вихідні дані (DP, TF, BD) також подаються у вигляді нечіткого набору.

Для цього застосуємо методи дефазифікації, щоб перетворити нечіткий вихід на чітке значення, яке представляє загальну якість моделі шрифту Брайля. Одним із поширених методів є дефазифікація центроїда, яка обчислюється як:

$$\delta_v = \frac{\int \delta \cdot \omega_o(\delta) d\delta}{\omega_o(\delta) d\delta} \quad (2.4.3)$$

δ_v – є чітким вихідним значенням $\omega_o(\delta)$ функції належності результатів.

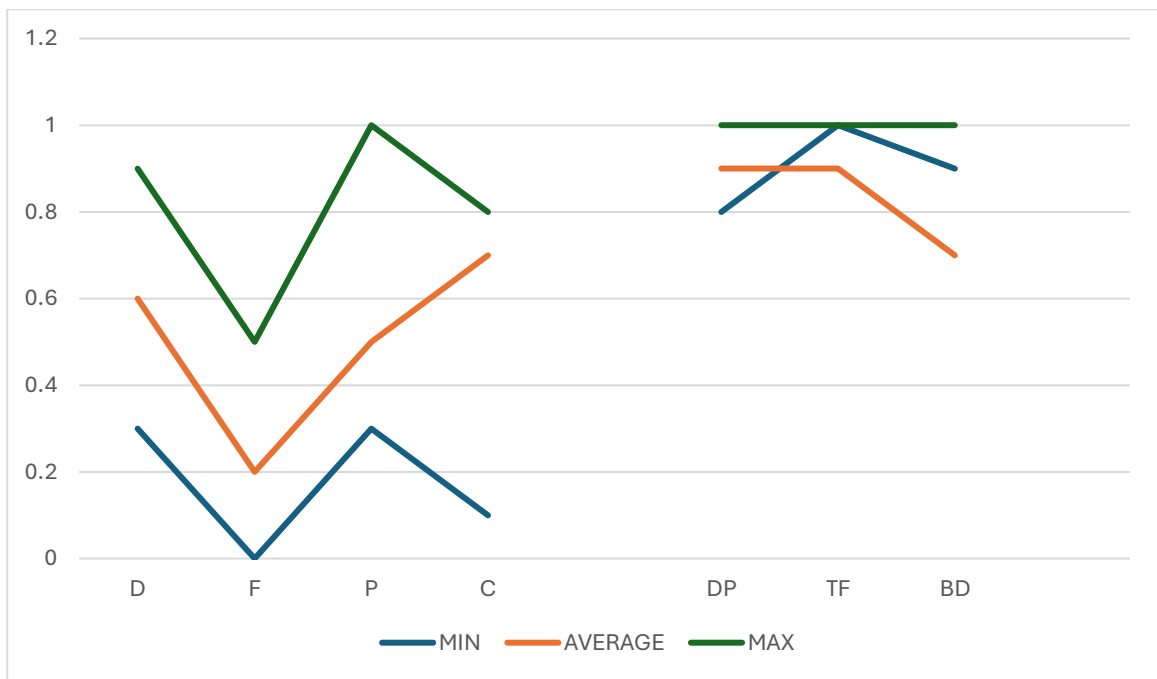


Рис. 2.4.1. Дефазифікація властивостей матеріалів для 3D-друку

Завдяки використанню методів дефазифікації нечітких даних можна отримати чіткі вихідні дані значення, як показано на рис. 2.4.1. Це дасть змогу визначати фактори та властивості матеріалів, а також їхній вплив на формування шрифту Брайля в процесах 3D-друку [89]. Методи дефазифікації є оптимальним рішенням для визначення факторів, але за певних умов не є остаточним. Альтернативою до використання дефазифікації є створення матриці впливів матеріалів, яка кількісно відображає, як кожна властивість матеріалу (D, F, P, C) впливає на характеристики моделі Брайля (DP, TF, BD).

Таблиця 2.4.2

Типи матеріалів для 3D-друку і їх значення дефазифікації

Матеріал	Міцність	Гнучкість	Точність	Ціна
<i>PLA (FDM)</i>	0.7	0.4	0.8	0.3
<i>ABS (FDM)</i>	0.8	0.5	0.6	0.2
<i>SLS (Nylon)</i>	0.9	0.6	0.7	0.8
<i>SLA&DLP (Resins)&PolyJet</i>	0.6	0.2	0.9	0.5

Для кожної властивості матеріалу, за винятком вартості (C), визначимо, наскільки вона впливає на чіткість крапок (DP), тактильний зворотний зв'язок (TF) і довговічність шрифту Брайля (BD) у моделі Брайля. Матриця впливу визначає кількісну залежність між властивостями матеріалів та характеристиками шрифту Брайля.

Таблиця 2.4.3

Властивості шрифту Брайля і їх значення дефазифікації

Властивості	DP	TF	BD
D	0.7	0.5	0.9
F	0.4	0.8	0.3
P	0.9	0.7	0.8

На основі цих даних побудуємо діаграму, яка відображає значення кожної властивості матеріалу (рис 2.4.2):

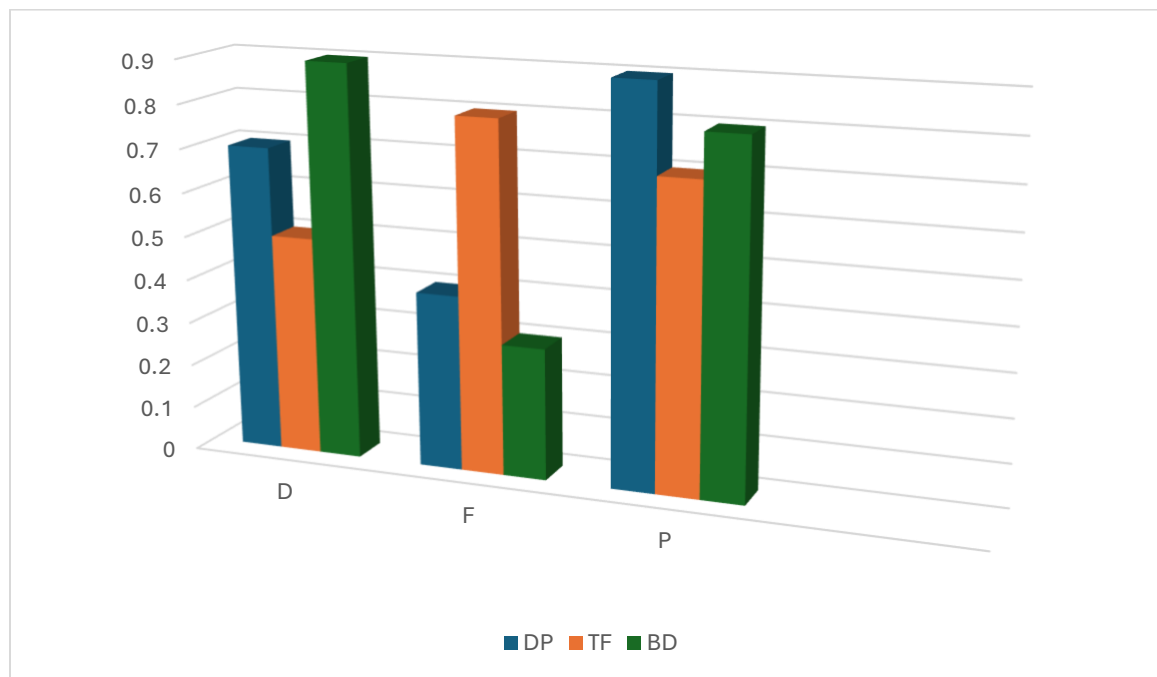


Рис. 2.4.2. Дефазифікація властивостей шрифту Брайля

Наступним кроком у визначенні факторів впливу матеріалів є врахування того, що кожен матеріал для 3D-друку має свої властивості, які впливають на якість формування шрифту Брайля та створення тривимірних моделей. Властивості

матеріалів і їх вплив на формування шрифту Брайля тісно пов'язані між собою. На допомогу приходить матричний метод, який допомагає визначити, як саме кожна властивість матеріалу впливає на характеристики Брайля в 3D-моделях. Це дає змогу отримувати комбіновані впливи, у результаті чого отримувати числові оцінки для визначення, наскільки кожен матеріал впливає на якість тексту шрифтом Брайля у 3D-моделях [89]. Для вхідних даних використаємо характеристики моделей Брайля – DP, TF, BD – на матрицю помножимо їх на матрицю впливу, записавши це у вигляді виразу:

$$f(x) = [M_i^v] \times I$$

M_i^v – є вектором властивостей матеріалу 1x3 (міцність, гнучкість, точність, ціна (D, F, P, C); I – матриця 3x3, що відображає вплив на характеристики шрифту Брайля (DP, TF, BD); $f(x)$ – вектор 1x3, який дає значення для характеристик шрифту Брайля (DP, TF, BD).

.Взявши до уваги дані з таблиці 2.4.1, для визначення вектора та впливу на характеристики шрифту Брайля, наприклад PLA матеріалу, запишемо це в математичному виразі, зауваживши, що нормалізоване значення становить – 1.0 :

$$\begin{aligned} M_{pla} = [0.7, 0.4, 0.8] I &= \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.9 \\ 0.4 & 0.8 & 0.3 \\ 0.9 & 0.7 & 0.8 \end{bmatrix} f(PLA) = [M_{pla}^v | 1] \times I f(PLA) \\ &= [0.7, 0.4, 0.8] \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.9 \\ 0.4 & 0.8 & 0.3 \\ 0.9 & 0.7 & 0.8 \end{bmatrix} DC_{pla} \\ &= (0.7 \times 0.7) + (0.4 \times 0.4) + (0.8 \times 0.9) = 0.49 + 0.16 + 0.72 = 1.37 \end{aligned}$$

Для матеріалу PLA отримано результат, що значення PLA матеріалу для точності крапки Брайля становить 1.37, що є більшим за стандарт, який становить – 1.0.

Для визначення інших значень матеріалів (PLA) для кожної характеристики шрифту Брайля аналогічним чином скористаємось формулами 2.4.1–2.4.4:

$$TF_{pla} = (0.7 \times 0.5) + (0.4 \times 0.8) + (0.8 \times 0.7) = 0.35 + 0.32 + 0.56 = 1.23$$

$$BD_{pla} = (0.7 \times 0.9) + (0.4 \times 0.3) + (0.8 \times 0.8) = 0.63 + 0.12 + 0.64 = 1.39$$

Для визначення інших матеріалів, таких як ABS, Resins (SLA), Resins (DLP), Nylon (SLS):

$$M_{|x|} = [0.8, 0.5, 0.6]$$

$$DC_{|f_{dm}|} = (0.8 \times 0.7) + (0.5 \times 0.4) + (0.6 \times 0.9) = 0.56 + 0.2 + 0.54 = 1.3$$

$$TF_{|f_{dm}|} = (0.8 \times 0.5) + (0.5 \times 0.8) + (0.6 \times 0.7) = 0.4 + 0.4 + 0.42 = 1.22$$

$$BD_{|f_{dm}|} = (0.8 \times 0.9) + (0.5 \times 0.3) + (0.6 \times 0.8) = 0.72 + 0.15 + 0.48 = 1.35$$

$$M_{sla} = [0.6, 0.2, 0.9]$$

$$DC_{sla} = (0.6 \times 0.7) + (0.2 \times 0.4) + (0.9 \times 0.9) = 0.42 + 0.08 + 0.81 = 1.31$$

$$TF_{sla} = (0.6 \times 0.5) + (0.2 \times 0.8) + (0.9 \times 0.7) = 0.3 + 0.16 + 0.63 = 1.09$$

$$BD_{sla} = (0.6 \times 0.9) + (0.2 \times 0.3) + (0.9 \times 0.8) = 0.54 + 0.06 + 0.72 = 1.32$$

$$M_{dlp} = [0.7, 0.3, 0.9]$$

$$DC_{dlp} = (0.7 \times 0.7) + (0.3 \times 0.4) + (0.9 \times 0.9) = 0.49 + 0.12 + 0.81 = 1.42$$

$$TF_{dlp} = (0.7 \times 0.5) + (0.3 \times 0.8) + (0.9 \times 0.7) = 0.35 + 0.24 + 0.63 = 1.22$$

$$BD_{dlp} = (0.7 \times 0.9) + (0.3 \times 0.3) + (0.9 \times 0.8) = 0.63 + 0.09 + 0.72 = 1.44$$

$$M_{sls} = [0.9, 0.6, 0.7]$$

$$DC_{sls} = (0.9 \times 0.7) + (0.6 \times 0.4) + (0.7 \times 0.9) = 0.63 + 0.24 + 0.63 = 1.5$$

$$TF_{sls} = (0.9 \times 0.5) + (0.6 \times 0.8) + (0.7 \times 0.7) = 0.45 + 0.48 + 0.49 = 1.42$$

$$BD_{sls} = (0.9 \times 0.9) + (0.6 \times 0.3) + (0.7 \times 0.8) = 0.81 + 0.18 + 0.56 = 1.55$$

Згідно з отриманими результатами можна дійти висновку, що матеріал ABS не є оптимальним для виготовлення брайлівських моделей, де необхідна висока

точність і складний текст. Водночас для простих тактильних моделей, які не потребують високої точності, він може бути оптимальним. Натомість SLS, DLP та PLA друк отримали високу оцінку з точності брайлівських крапок. Для наукового дослідження обираємо матеріали, які мають найвищу оцінку, а саме – DLP/SLS та PLA.

2.5. Переваги та недоліки інформаційних систем при формуванні тактильного шрифту

ІС – це комплексний процес керування інформацією, який охоплює як обробку інформації, так і її зберігання. Тому необхідно проаналізувати використання інформаційних систем у процесах адитивного виробництва для створення тактильних брайлівських моделей. Застосування ІС у процесах виробництва є одним з основних чинників, хоча воно має свої переваги та недоліки. Першим кроком – буде визначення типів інформаційних систем, які використовуються в процесах адитивного виробництва для створення тактильних моделей:

Таблиця 2.5.1

Аналіз інформаційних систем у процесах адитивного виробництва

ТИП	ОПИС	ПРОГРАМИ
CAD (Система автоматизованого проєктування та розрахунків)	Для створення 3D-моделей	Autodesk Inventor, SolidWorks, Blender. FreeCAD, OnShape, OpenSCAD
CAM (Системи автоматизованого виробництва)	Для перетворення 3D-моделей САПР на машинні інструкції для ЧПУ	Fusion 360, Mastercam
PLM (Системи управління життєвим циклом продукту)	Управління всім життєвим циклом продукту, від створення до утилізації	Siemens Teamcenter, PTC Windchill
ERP (Системи планування ресурсів підприємства)	Інтеграція різних підрозділів виробництва, від фінансового відділу до продажів і т.п.	SAP ERP, Oracle ERP

Виходячи з аналізу інформаційних систем у процесах адитивного виробництва, найпоширенішим є використання систем автоматизованого проектування (CAD). Хоча інші ІС можуть бути інтегровані, якщо є потреба в підприємства або у виробника. Кожен тип такої системи має свої переваги й недоліки, але проведення оцінювання кожної з них потребує багато часу, і провести оцінювання неможливо, оскільки кожне підприємство висуває власні критерії при виборі інформаційної системи. Таким чином, використання інформаційних систем має свої переваги та недоліки.

Переваги: 1) вища точність і гарантія якості у створенні моделей. Завдяки використанню ІС є можливість контролювати процеси, уникати помилок ще до початку запуску масового виробництва. Це дозволяє створювати високоякісні моделі, зокрема брайлівські тактильні моделі [84]; 2) автоматизація процесів зменшує ризик помилок, пов'язаних із втручанням людини, а також дозволяє скоротити потребу в чисельному персоналі на підприємстві; 3) персоналізація дозволяє створювати індивідуальні прототипи, розробляти власні стандарти, проводити експерименти та здійснювати тестування моделей до масового виробництва; 4) гнучкість до модифікації та дизайну дає можливість створювати складні моделі з більш високим рівнем деталізації шрифту Брайля; 5) прискорене виробництво є ключовою перевагою для прийняття рішень підприємств інтегрувати ІС у виробництво. Це дозволяє уникати зайвих витрат, а також пришвидшує масове виробництво; 6) масштабованість ІС полягає у здатності обробляти великі обсяги даних, зокрема приймати замовлення або аналізувати вимоги до створення тактильних моделей; 7) централізоване зберігання даних забезпечує швидкий доступ до інформації з різних локацій; контроль якості створення моделей дає змогу здійснювати постійний моніторинг за процесами виробництва, тим самим уникаючи зайвих витрат; екологічність та оптимізація використання ресурсів полягають у зменшенні витрати матеріалу, який

використовується в адитивному виробництві, часу, відходів та зайвої роботи [84].

Недоліки: 1) Впровадження інформаційних систем вимагає значних фінансових витрат на придбання програмного та апаратного забезпечення. Крім того, технічне обслуговування, регулярні оновлення й модернізація систем можуть спричиняти додаткові витрати; 2) використання передових інформаційних систем потребує спеціальних знань і навичок, що передбачає навчання персоналу. Інтеграція нових інформаційних систем з наявними робочими процесами й технологіями може бути складною та ресурсозатратною;

3) залежність від інформаційних систем робить процес виробництва вразливим до технічних проблем, таких як помилки програмного забезпечення, апаратні проблеми або кібератаки. Крім того, захист конфіденційних даних, зокрема файлів дизайну та параметрів виробництва, від несанкціонованого доступу чи злому може бути складним завданням;

4) обмежений доступ, оскільки не всі організації чи особи мають можливості використовувати необхідні технології і ресурси для впровадження передових інформаційних систем. Залежність від цифрових інструментів може посилити нерівність, якщо частина зацікавлених сторін не матимуть змоги дозволити собі або використовувати ці технології;

5) вплив на навколишнє середовище, оскільки інформаційні системи та процеси адитивного виробництва можуть споживати значну кількість енергії, сприяючи екологічним проблемам. Незважаючи на зменшення відходів, адитивне виробництво все ж створює деякі матеріальні відходи [85].

Поміж іншого, після створення 3D-моделей за допомогою різноманітних інформаційних систем (CAD, CAM) наступним кроком є використання слайсерів – спеціалізованих програм для підготовки моделей до 3D-друку. Слайсери працюють із певними форматами файлів, необхідними для 3D-друку. Є безліч видів слайсерів,

таких як Ultimaker Cura, Prusa Slicer, Autodesk Netfab, Slic3r, усі вони підтримують різні види технологій 3D-друку, та кожен слайсер має підтримку певних форматів файлів. Найпоширенішим форматом є STL-формат, а також 3MF, AMF, OBJ. Формати файлів впливають на створення моделей із шрифтом Брайля [89]. Для проведення аналізу виконаємо порівняння цих форматів:

STL (Stereolithography). Є найпоширенішим форматом для 3D-друку. Описує поверхню моделі за допомогою трикутників. Не містить інформації про колір, текстуру або матеріали. Підходить для моделей Брайля, оскільки основне завдання – передати форму точок.

OBJ (Object File). Формат, який підтримує інформацію про поверхню моделі, включаючи координати вершин та текстури. Може використовуватися для більш складних моделей, однак для моделей Брайля не настільки необхідний.

AMF (Additive Manufacturing File). Має більше можливостей порівняно з STL, наприклад, підтримку кольорів та матеріалів. Рідко використовується для простих 3D-моделей, таких як моделі Брайля.

3MF (3D Manufacturing Format). Сучасний формат підтримується багатьма слайсерами. Оптимізований для 3D-друку, дозволяє зберігати інформацію про матеріали, кольори та інші параметри.

Використання інформаційних систем у формуванні тактильних шрифтів за допомогою адитивного виробництва забезпечує низку переваг, зокрема точність, налаштування, ефективність і управління даними. Однак ці переваги супроводжуються певними проблемами, такими як високі початкові витрати, технічна складність і залежність від технології. Оптимальний вибір ІС є одним із ключових факторів, які впливають на якість створення 3D-моделей із формуванням шрифту Брайля.

Висновки до розділу 2

1. Проведено аналіз технологій 3D-моделювання для створення тактильних моделей, розглянуто види програмного забезпечення, їхню функціональність, а також фактори, які впливають на формування шрифту Брайля.
2. Проаналізовано технології адитивного виробництва (3D-друку). Виконано порівняльний аналіз традиційними методами виготовлення та 3D-друком, розглянуто їхні переваги, недоліки та вартість. Розглянуто фактори впливу на якість формування шрифту Брайля.
3. Проведено дослідження процесів роботи 3D-принтера: особливості функціонування та механізми 3D-принтерів, а також фактори впливу на створення брайлівських тактильних моделей.
4. Проаналізовано види матеріалів, які застосовуються в різних видах 3D-друку, їх фізичні та хімічні властивості, а також їхній вплив на формування шрифту Брайля.
5. Проведено дослідження факторів впливу матеріалів 3D-друку на якість формування рельєфно-крапкового шрифту Брайля на тривимірних моделях. Проаналізовано властивості матеріалів щодо здатності забезпечувати чітке тактильне зчитування шрифту незрячими користувачами. Наведено основні інструменти, які використовуються для формування шрифту Брайля з використанням технології 3D-друку. Подано порівняльну таблицю з перевагами та недоліками, які можуть виникати під час формування крапкового шрифту.
6. Розглянуто переваги та недоліки інформаційних систем для формування рельєфно-крапкового шрифту Брайля. Наведено основні інформаційні системи, які застосовують для створення шрифту Брайля. Проведено їх порівняльний аналіз та обґрунтовано важливість подальшого розвитку інформаційних систем для створення шрифту Брайля і створення дисплеїв

із використанням адитивних технологій.

7. Проведено аналіз та порівняння CAD-систем, що використовуються під час розробки 3D-моделей і формування шрифту Брайля. Наведено програмне забезпечення для створення тривимірних моделей із рельєфно-крапковим шрифтом. Обґрунтовано недоліки наявних CAD-систем і важливість їх подальшого розвитку. Здійснено вибір CAD-системи, яка найбільш відповідає потребам створення тривимірних моделей із формуванням крапкового шрифту, однак вона також має недоліки та складнощі, що свідчить про потребу розроблення нового критеріїв та програмного забезпечення.

Розділ 3.

МОДЕЛІ ТА ЗАСОБИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ШРИФТУ БРАЙЛЯ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Концепція дослідження процесу формування шрифту Брайля та процесів адитивного виробництва

Сучасні інформаційно-поліграфічні технології і процеси адитивного виробництва і їх використання в інклюзивній освіті й створенні доступних умов життя для незрячих людей передусім повинні бути зорієнтовані не тільки на критерії та стандарти формування шрифту Брайля в адитивному виробництві, що базуються на інструкціях і виробничих вимогах, а й на потреби осіб із порушеннями зору і їхні фізіологічні можливості сприйняття інформації. Упродовж останніх років, а навіть десятиліть спостерігається науково-технічний прогрес і трансформація виробництва з використанням новітніх технологій, зокрема адитивного виробництва, яке охоплює 3D-моделювання, 3D-принтери, програмне забезпечення тощо. Такі технології суттєво змінюють підхід до принципів традиційного виробництва, тож підприємства змушені оперативно адаптуватися до нових умов. Утім, з іншого боку, впровадження таких технологій може виявитися економічно не вигідним без проведення дослідження, наскільки ефективним буде використання конкретних технологій і матеріалів для отримання якісного кінцевого продукту.

Значного технологічного прогресу досягнуто також у сфері адитивного виробництва, яке постійно вдосконалюється та адаптується до сучасних потреб. Особливо активного розвитку останніми роками зазнає штучний інтелект, здатний радикально змінити всі процеси виробництва та вирішити виробничі проблеми, які залишалися невирішеними протягом століть. Однак однією з актуальних проблем залишається недостатнє вивчення можливостей адитивного виробництва в контексті інклюзивної освіти, зокрема для формування якісного шрифту Брайля за

допомогою 3D-моделювання та 3D-друку. Саме цій проблематиці присвячена дисертаційна робота.

Найважливішими чинниками формування шрифту Брайля за допомогою адитивного виробництва є матеріали для 3D-друку, типи 3D-принтерів, а також програмне забезпечення, кількість якого є дуже великою. Проте значна частина цих програм є складною для опанування, і дослідники не завжди мають час для глибокого вивчення всіх доступних інструментів. Це суттєво впливає на кінцеву якість моделей із шрифтом Брайля. Крім того, програмне забезпечення з можливістю тривимірної графіки не підтримують шрифт Брайля, що є критичним бар'єром для виробництва моделей із рельєфно-крапковим шрифтом. Ураховуючи зазначені проблеми можна визначити шляхи їх вирішення, спрямовані на вдосконалення технологій адитивного виробництва та розвиток інформаційних систем здатних якісно формувати шрифт Брайля з урахуванням потреб людей із порушеннями зору. Важливим напрямом є також інтеграція штучного інтелекту для аналізу недоліків тривимірних цифрових моделей і надрукованих об'єктів за допомогою адитивних технологій.

Отже, наявні проблеми потребують вирішення та активної інтеграції до інклюзивної освіти, щоб незрячі люди мали можливість отримувати й досліджувати інформацію із зовнішніх джерел. Основні теми, які розглядаються в попередньому та в цьому розділі, є: формування шрифту Брайля в адитивному виробництві, дослідження процесів роботи 3D-принтерів, вплив матеріалів для 3D-друку, використання програмного забезпечення для тривимірного моделювання, а також взаємозв'язки між 3D-друком та формуванням шрифту Брайля.

Покращення технології адитивного виробництва для створення деталей і моделей для людей із порушеннями зору та незрячих потребує особливого підходу до вирішення цієї проблематики, оскільки чинники впливу на формування

рельєфно-крапкового шрифту Брайля за допомогою 3D-друку передбачає дотримання певних стандартів і врахування специфіки процесу. У цьому контексті важливо розробити технічні вимоги та створити дорожню карту розвитку адитивних технологій з орієнтацією на інклюзію. Вона має охоплювати такі ключові аспекти: стандарти 3D-принтерів, які застосовуються для інклюзії; програмне забезпечення слайсерів для виводу на друк; вимоги до матеріалів для 3D-друку, їх надійність і фізико-хімічні властивості; стандарти розмірів шрифту Брайля на тривимірних моделях: розміщення крапок, їх висота та відстань між ними; якість нанесення шрифту 3D-принтером.

Велика кількість вимог і параметрів стандартизації зазначених особливостей свідчить про необхідність використання та впровадження наукового концептуального підходу, в основі якого – аналіз факторів, які впливають на якість формування рельєфно-крапкового шрифту Брайля. Залежно від поставлених завдань ці фактори можуть виступати як базові інформаційні змінні або як математичне підґрунтя для використання методів нечіткої логіки. У результаті цього стає можливим застосовувати системний аналіз методи, що базуються на результатах тривимірного моделювання, з подальшим математичним моделюванням ієрархій, створенням різних критеріїв оптимізації та встановленням пріоритетних факторів впливу на якість шрифту в тривимірних моделях. На основі отриманих результатів виконується проєктування нових рішень та математичні розрахунки оптимальних стандартів процесу адитивного виробництва з акцентом на інклюзивність. Також здійснюється розрахунок за допомогою теорії нечітких множин із метою прогностичного оцінювання факторів впливу якості моделей, створених для інклюзії.

Важливу проблематику наукового дослідження є процес формування шрифту Брайля в адитивному виробництві з використанням різного програмного забезпечення для тривимірного моделювання, а також інших факторів впливу на

якість 3D-друку. В основі дослідження лежить застосування нечіткої логіки оцінювання та прогнозування якості формування шрифту Брайля. Складовою цього дослідження є ієрархічна структура та рівні аналізу, у межах яких послідовно реалізуються завдання. У результаті цього вибудовується концепція адитивного виробництва. Принцип побудови дослідження процесу виробництва ґрунтується на підході «зверху-вниз»: виокремлення факторів впливу є стартовим процесом, після чого розробляється семантична мережа зі зв'язками між ними. Подальшим етапом є синтез моделей із встановленими пріоритетами факторів, які впливають на виробництво і якість, із подальшим проєктуванням і математичними розрахунками оптимальних стандартів процесу на основі корисності. Наступним кроком є створення моделі компонентів нечіткої логічної системи для прогностичного оцінювання на етапах виробництва, яка є математичною лінгвістичною зміною. Останнім кроком є інтеграція розроблених стандартів в інформаційну-поліграфічну систему оцінювання якості формування рельєфно-крапкового шрифту для незрячих людей. Нижче на рис. 3.1.1 наведено етапи наукового дослідження, а також їхні складові компоненти:

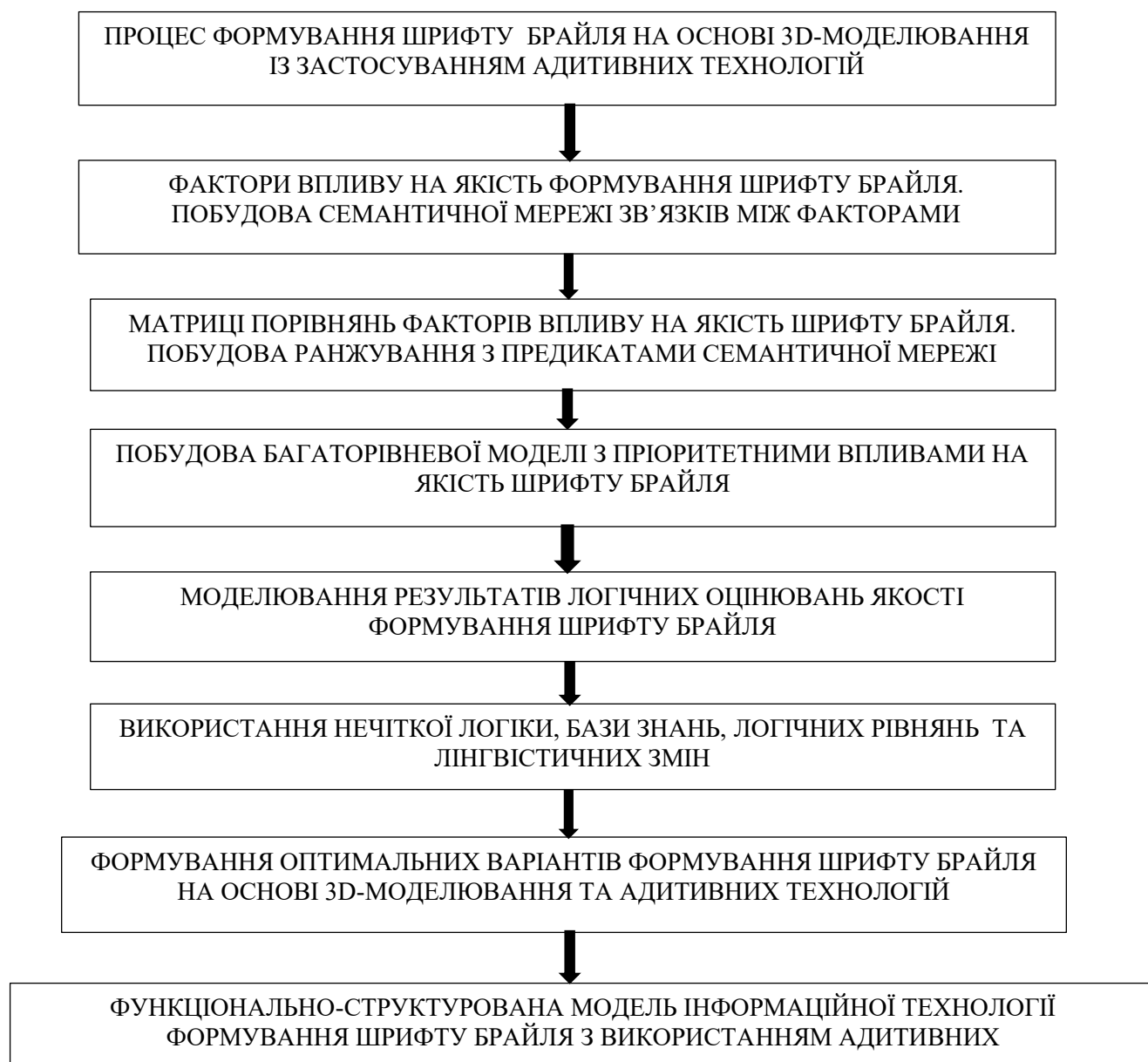


Рис. 3.1.1. Модель дослідження процесу формування шрифту Брайля на основі 3D-моделювання з використанням адитивних технологій

3D-моделювання з формуванням шрифту Брайля для тактильного зчитування інформації з моделей має суттєві труднощі та проблеми у виробництві. Це беззаперечний доказ того, що питання формування шрифту Брайля за допомогою адитивного виробництва набуває все більшої актуальності і потребує розв'язання шляхом створення дорожньої карти розвитку технології та розробки сучасних

інформаційних систем. Проблема полягає в недостатньому розвитку адитивного виробництва для впровадження в інклюзію, що задовольняє потреби людей із порушеннями зору та незрячих. Чинником цієї проблеми є те, що адитивна технологія досить нещодавно почала активно розвиватись та інтегруватись у виробництво. У науковому середовищі їй поки що приділяється недостатньо уваги: бракує статичних даних, лабораторних досліджень та рекомендацій щодо цільового використання адитивної технології. Окрім того, недостатньо розвинута інклюзія та відсутність програмного забезпечення, яке здатне підтримувати рельєфно-крапковий шрифт із подальшим виведенням на 3D-друк. Також відсутні стандарти щодо формування шрифту Брайля, є потреба в інтеграції штучного інтелекту в адитивне виробництво, яке здатне автоматизувати процеси та підвищити якість результату та ін.

3.2. Формалізація зв'язків між факторами впливу на процес створення моделей із шрифтом Брайля в адитивному виробництві

Етапи створення тривимірних моделей в адитивному виробництві для інклюзії осіб із порушеннями зору та незрячих, розглянуто в попередніх розділах. Стандарти та вимоги викладено на основі проведеного аналізу та числових параметричних значень, а для інших ситуацій застосовуються лінгвістичні рекомендації. Проте наявні дані унеможливають їх формалізоване визначення та створення вихідних результатів, а також побудову інформаційної бази даних на основі єдиних стандартів і метричної шкали. Лише на основі таких стандартів стає можливим подальший розвиток адитивного виробництва і проведення наукових досліджень, зокрема – розроблення нових інформаційних систем, програмних розширень, наукових методів, моделей і методологій інформаційного, адитивного спрямування, включаючи розв'язання проблем інклюзії для осіб із порушеннями зору та незрячих.

Згідно з проведенням аналізом у 1–2 розділах цієї дисертації, а також на основі статей, зокрема «Factors influencing the creation of Braille 3d models in additive manufacturing» [89], «Аналіз факторів 3D-принтерів на створення 3D-моделей Брайля», а також досліджень науковців, таких як Зацерковна Р.В., Маїк В.З., Згалат-Лозинський О.Б, визначимо із загальної множини факторів впливу ті, що стосуються створення моделей зі шрифтом Брайля в адитивному виробництві. Ці фактори можна згрупувати в окремі підмножини, згідно з якими є можливість охарактеризувати відповідні процеси та стандарти, подаючи їх у такому вигляді [86]:

$$\chi = \{S1 + S2 + S3 + S4 \dots S6\}, \quad (3.2.1)$$

Перший етап, де $S1$ – інформаційна система для створення тривимірної моделі. $S2$ – складність створення 3D-моделі та тексту шрифтом Брайля. $S3$ – програмне забезпечення слайсери. $S4$ – тип 3D-друку та 3D-принтера. $S5$ – матеріали для 3D-друку. $S6$ – розмір клітинок Брайля та сітки

$$\chi = \{T1 + T2 + T3 + T4 \dots S6\}, \quad (3.2.2)$$

висота крапки – $T1$; діаметр крапки – $T2$; відстань між крапками – $T3$; довговічність матеріалу – $T4$; оздоблення поверхні моделі – $T5$; роздільна здатність шару – $T6$.

Для математичного вираження, тобто визначення ваги впливу згаданих параметрів факторів впливу на процес формування шрифту Брайля в адитивному виробництві, представимо зв'язки між ними за допомогою семантичної мережі (рис 3.2.1), що подана у вигляді графів, вузлів та вершин, які представляють семантику певних понять, зокрема інформаційних чинників процесів виробництва. Лінії є відображенням функціональних або семантичних відношень, тобто зв'язків між окремими вершинами, та є частинами логістичних, лінгвістичних рівнів [86, 87].

У цій семантиці (вузлах) виведемо такі фактори множини: $X = (S1 + S2 + S3 \dots S6)$, та $X = (T1 + T2 + T3 \dots T6)$, а лінії між вузлами

визначатимуть відношення до факторів, тобто впливи та залежності, які представлені предикатами, що визначають характер зв'язків [88]. Нижче наведено семантичну структуру факторів впливу на формування шрифту Брайля в адитивному виробництві.

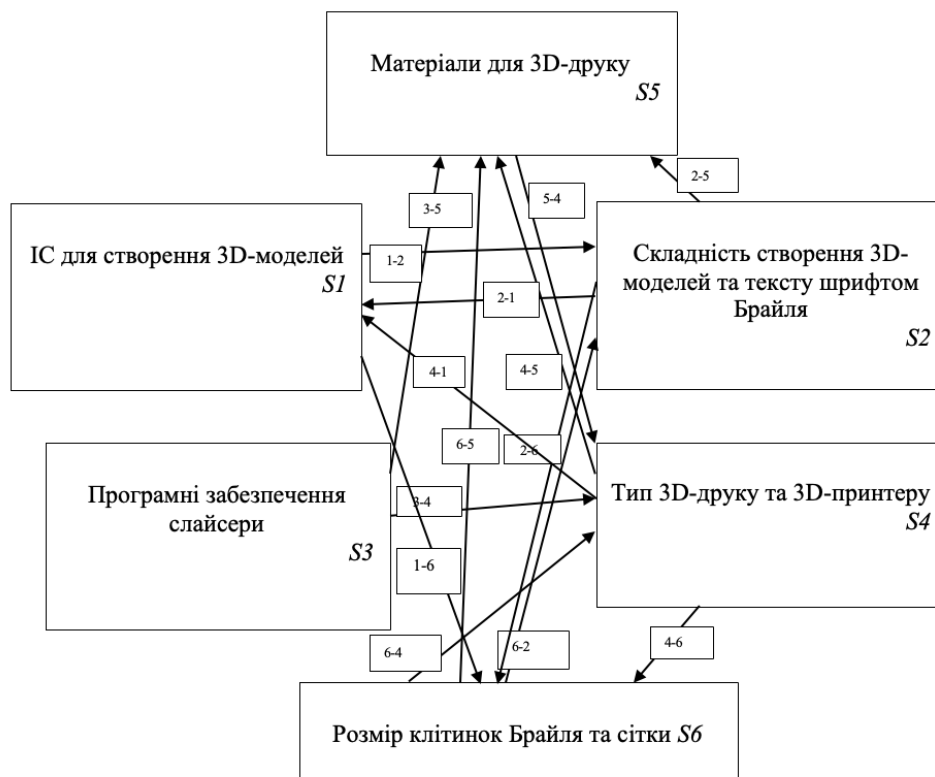


Рис. 3.2.1. Семантична мережа факторів процесу формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання(процеси адитивного виробництва)

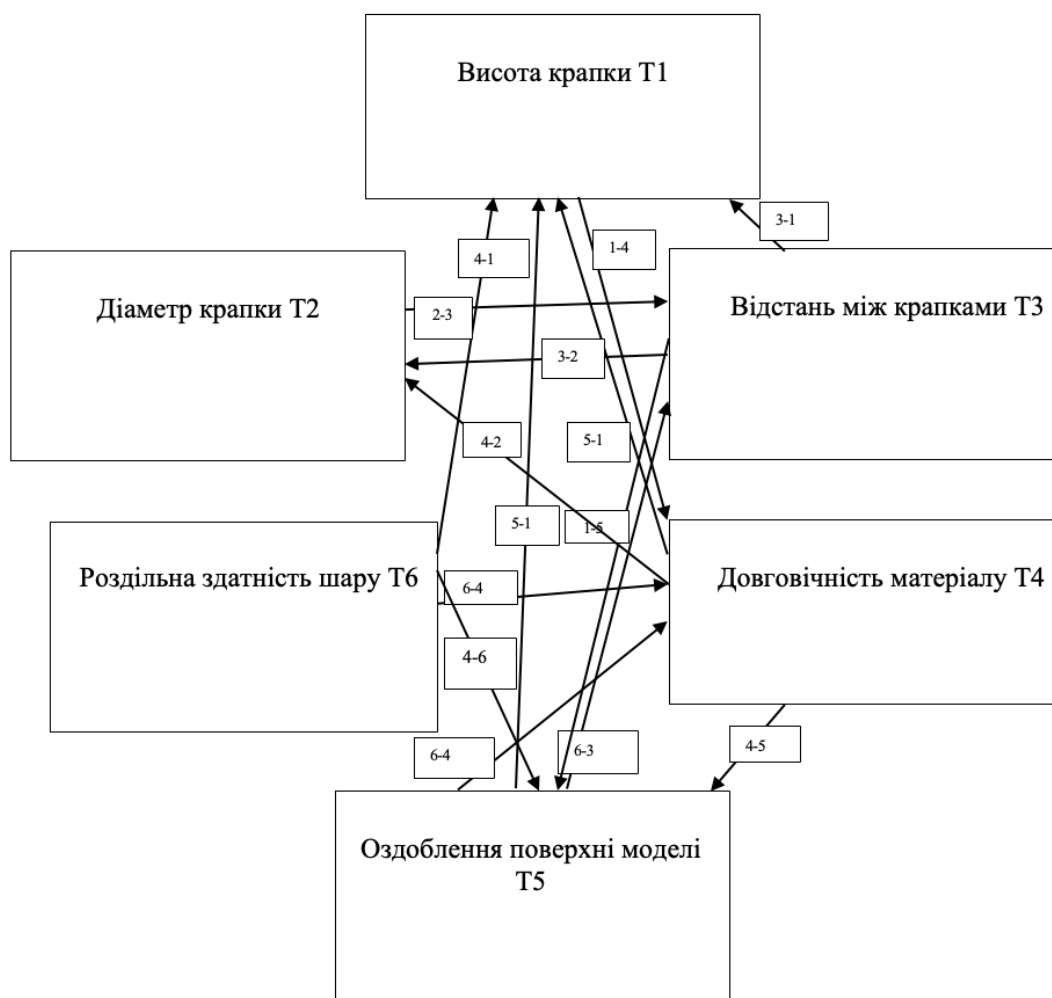


Рис. 3.2.2. Семантична мережа факторів процесу формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання (характеристики тексту Брайля)

Для опису відношень між факторами будуть визначатись елементи мови предикатів, що містять звичайні або атомарні предикати та логічні зв'язки: $\wedge$ – логічне «і»; $\vee$ – логічне «або»; $\leftarrow$ – логічне «якщо»; $\forall$ – квантор спільності (для всіх); $\exists$ – квантор існування (мінімум один фактор) [88]. У результаті отримаємо такі формально-лінгвістичні початкові дані:

- $(\forall x_i) [\exists (S_1) \leftarrow \text{обумовлює} (S_2) \wedge \text{формує} (S_6)]$;
- $(\forall x_i) [\exists (S_2) \leftarrow \text{ґрунтується} (S_1) \wedge \text{впливає} (S_6) \wedge \text{стає основою} (S_5)]$;
- $(\forall x_i) [\exists (S_3) \leftarrow \text{ґрунтується} (S_4) \wedge \text{передбачає} (S_5)]$;

$(\forall x_i) [\exists (S4) \leftarrow \text{передбачає } (S1) \wedge \text{ґрунтується } (S5) \wedge \text{обумовлює } (S6)]$;
 $(\forall x_i) [\exists (S5) \leftarrow \text{визначає } (S4)]$;
 $(\forall x_i) [\exists (S6) \leftarrow \text{ґрунтується } (S2) \wedge \text{визначається } (S5)]$;
 $(\forall x_i) [\exists (T1) \leftarrow \text{обумовлює } (T2) \wedge \text{формує } (T4)]$;
 $(\forall x_i) [\exists (T4) \leftarrow \text{ґрунтується } (T3) \wedge \text{впливає } (T6) \wedge \text{стає основою } (T5)]$;
 $(\forall x_i) [\exists (T6) \leftarrow \text{ґрунтується } (T5) \wedge \text{передбачає } (T1)]$;
 $(\forall x_i) [\exists (T3) \leftarrow \text{передбачає } (T1) \wedge \text{ґрунтується } (T5) \wedge \text{обумовлює } (T6)]$;
 $(\forall x_i) [\exists (T5) \leftarrow \text{визначає } (T4)]$;
 $(\forall x_i) [\exists (T3) \leftarrow \text{ґрунтується } (T2) \wedge \text{визначається } (T1)]$;

Такий спосіб представлення семантичної мережі є вихідною інформаційно-технологічною базою даних, яка включає лінгвістичні дані та формальне відтворення зв'язків між процесами або факторами у вигляді граф. Це дозволяє покращити використання її для різних методів моделювання ієрархічних рівнів, зокрема для ранжування факторів, визначення пріоритетів, які будуються на основі парних порівнянь, і застосовувати нечітку логіку для прогностичного оцінювання й параметризації якості формування шрифту Брайля в умовах 3D-друку.

Для опису відношень між параметрами і їх факторами в загальному процесу адитивного виробництва – від створення 3D-моделей, вибору матеріалів, геометричних параметрів, процесу друку до оцінки кінцевого результату і якості тривимірної моделі зі шрифтом Брайля – буде використано мову предикатів. Як приклад, розглянемо окремі елементи предикатів, пов'язані з характеристиками шрифту Брайля, які включають атомарні предикати та логічні зв'язки.

1. T1 та T2:

– Вища висота крапки (T1) часто вимагає пропорційного регулювання діаметра крапки (T2), щоб підтримувати збалансований читабельний вигляд ($T1 \rightarrow T2$)

2. T1 та T3:

— Збільшення висоти крапки (T1) може потребувати більшого інтервалу (T3), щоб

запобігти скупченню та забезпечити цілісність кожної крапки ($T1 \rightarrow T3$)

3. $T1$ $T4$:

– Більш високі крапки ($T1$) можуть створювати більше навантаження на матеріал, відтак потребуючи міцнішого матеріалу ($T4$) для збереження структури ($T1 \rightarrow T4$)

4. $T1$ та $T5$:

– Більш високі показники можуть впливати на загальну текстуру, що вимагає спеціальної обробки поверхні ($T5$) для досягнення бажаного вигляду та відчуття ($T1 \rightarrow T5$)

5. $T1$ та $T6$:

– Більша висота крапки ($T1$) може вимагати вищої роздільної здатності шару ($T6$), щоб забезпечити точну та гладку структуру крапок ($T1 \rightarrow T6$)

6. $T2$ та $T1$:

— Зміна діаметра крапки ($T2$) може вимагати коригування висоти крапок ($T1$), щоб зберегти загальний баланс і візуальну привабливість ($T2 \rightarrow T1$)

7. $T2$ та $T3$:

– Збільшення діаметра крапки ($T2$) може вплинути на відстань між крапками ($T3$), щоб уникнути накладання ($T2 \rightarrow T3$)

8. $T2$ та $T4$:

– Великі крапки ($T2$) можуть вимагати більш міцного матеріалу ($T4$) для підтримки структурної цілісності ($T2 \rightarrow T4$)

9. $T2$ та $T5$:

– Діаметр крапки ($T2$) впливає на фінішну поверхню моделі ($T5$), оскільки різні діаметри створюють різний візуальний і тактильний ефект ($T2 \rightarrow T5$)

10. $T2$ та $T6$:

– Зі зміною діаметра крапок ($T2$) може знадобитися відповідне налаштування роздільної здатності шару ($T6$) для забезпечення точного відтворення ($T2 \rightarrow T6$)

11. $T3$ та $T1$:

– Відстань між крапками (T3) має бути скоригована залежно від висоти крапок (T1), щоб уникнути візуального перекриття.

12. T3 та T2:

– Відстань між крапками (T3) залежить від діаметра крапок (T2), щоб забезпечити рівномірне розподілення ($T3 \rightarrow T2$)

13. T3 та T4:

– Щільність розміщення крапками (T3) впливає на вимоги до міцності матеріалу (T4), тому що більша щільність розміщення потребує міцнішого матеріалу ($T3 \rightarrow T4$)

14. T3 та T5:

- Відстань між крапками (T3) безпосередньо впливає на фінішну поверхню моделі (T5), створюючи різні візуальні ефекти.

15. T3 та T6:

– Зміна відстані між крапками (T3) може вимагати відповідних налаштувань роздільної здатності шару (T6).

16. T4 та T1:

– Довговічність матеріалу (T4) повинна відповідати висоті крапок (T1), щоб забезпечити структурну цілісність ($T4 \rightarrow T1$)

17. T4 та T2:

– Міцність матеріалу (T4) впливає на допустимі розміри крапок (T2) для запобігання деформаціям ($T4 \rightarrow T2$)

18. T4 та T3:

– Матеріали з різною міцністю (T4) можуть потребувати зміни густоти крапок (T3) для рівномірного розподілу навантаження ($T4 \rightarrow T3$)

19. T4 та T5:

– Міцність матеріалу (T4) впливає на фінішну обробку поверхню (T5), оскільки різні матеріали можуть давати різний візуальний результат ($T4 \rightarrow T5$).

20. T4 та T6:

– Міцні матеріали (T4) можуть дозволяти використовувати високу роздільну здатність шарів (T6) для більш детальної моделі (T4 → T6)

21. T5 та T1:

– Фінішна поверхня (T5) має враховувати висоту точок (T1) для досягнення бажаного тактильного та візуального ефекту (T5 → T1)

22. T5 та T2:

– Діаметр точок (T2) безпосередньо впливає на кінцевий вигляд фінішної поверхні (T5).

23. T5 та T3:

– Відстань між крапками (T3) може бути змінена для створення різних текстур на фінішній поверхні (T5). (T5 → T3)

24. T5 та T4:

– Фінішна поверхня (T5) залежить від міцності матеріалу (T4), тому що різні матеріали мають різні характеристики фінішу (T5 → T4)

25. T5 та T6:

– Для досягнення бажаного фінішного вигляду (T5) може знадобитися відповідна роздільна здатність шарів (T6). (T5 → T6)

26. T6 та T1:

– Роздільна здатність шару (T6) безпосередньо впливає на висоту крапок (T1) для забезпечення гладкості і точності (T6 → T1)

27. T6 та T2:

– Більш висока роздільна здатність шарів (T6) дозволяє точно відтворити діаметр точок (T2). (T6 → T2)

28. T6 та T3:

– Роздільна здатність шару (T6) може вплинути на відстань між крапками (T3), забезпечуючи точне розміщення. (T6 → T3)

29. T6 та T4:

– Висока роздільна здатність шарів (T6) може вимагати більш міцного матеріалу (T4) для запобігання деформаціям (T6 → T4)

30. T6 та T5:

– Роздільна здатність шару (T6) впливає на фінішну поверхню (T5), створюючи різні візуальні та тактильні ефекти (T6 → T5).

Представлені атомарні предикати для семантичної мережі параметрів з факторами впливу стануть основою для використання спеціалізованих значень коефіцієнтів для збільшення впливу факторів або, навпаки, зменшення, зокрема і для врахування залежностей парних зв'язків між параметрами і їх факторами при встановленні ранжування за важливістю.

3.3. Багаторівнева модель факторів впливу, враховуючи точність відтворення рельєфно-крапкового шрифту процесах 3D-друку

Багаторівнева модель впливу факторів на якість і точність формування шрифту Брайля в адитивному виробництві є методом аналізу впливу різних параметрів і чинників на геометричні параметри та тактильні властивості елементів шрифту Брайля, надрукованих на тривимірних моделях із використанням різних матеріалів.

Для визначення та отримання результатів пріоритетних параметрів і пов'язаних із ними факторів можуть бути використані методи логічних математичних моделювань ієрархії, побудованої на наявних зв'язках або потенційних (непрямих) зв'язках між параметрами. Отримані результати представимо у квадратичних матриць досяжності та бінарних елементів, які формуються в результаті логічних стандартів.

$$f(x^{ab}) = \begin{cases} 0 & \text{— коли звершини та мережі є досягнутими } b \\ 1 & \text{— в інших ситуаціях} \end{cases}$$

Таблиця 3.3.1

Матриця досяжності в процесах адитивного виробництва (комплексні процеси)

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
S1	0	1	0	0	0	1
S2	1	0	0	0	1	1
S3	0	0	0	1	1	1
S4	0	1	1	0	1	0
S5	0	1	1	1	0	0
S6	0	1	0	1	1	0

Таблиця 3.3.1.1

Матриця досяжності характеристик тексту шрифтом Брайля (якість Брайля)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
T1	0	1	1	1	1	1
T2	1	0	1	1	1	1
T3	1	1	0	1	1	1
T4	1	1	1	0	1	1
T5	1	1	1	1	0	1
T6	1	1	1	1	1	0

Для подальших досліджень та отримання результатів буде використано ітераційні таблиці, побудовані відповідно до таких стандартів і правил:

- Рядки і їх кількість – визначається числами факторів впливу
- Перша колонка – номери факторів впливу
- Наступні колонки – номери параметрів рядків досяжності в матриці, які відповідають номерам досяжних вершин сітки; цю множину позначимо $A(S1)$, тоді як останній стовпець формується на основі основному виразі (3.3.1) і містить перетини підмножин. Він використовується для визначення

номерів параметрів, які забезпечують рівні пріоритети в адитивному виробництві.

$$Q(r\gamma) = A(r\gamma) \cap B(r\gamma), \quad 3.3.1$$

Для того, щоб встановити рівень фактору або параметру, визначимо таку кінцеву умову:

$$B(r\gamma) = Q(r\gamma), \quad 3.3.2$$

Таблиця 3.3.2

Ітерація 1-го рівня вагомості факторів:

1) Комплексні процеси адитивного виробництва

$r\gamma$	$A(r\gamma)$	$B(r\gamma)$	$A(r\gamma) \cap B(r\gamma)$
1	2,6	2,6	1
2	1, 6, 5	5,6	2
3	3,4, 5,6	3,5,6	3
4	2,3,4,5	4	4
5	2,3,4,5	5	5
6	2,4,5,6	2,6	6

2) Якість моделі Брайля

$r\gamma$	$A(r\gamma)$	$B(r\gamma)$	$A(r\gamma) \cap B(r\gamma)$
1	1,2,3,4,5	1	1
2	1,2,3,4,5,6	2	2
3	1,2,3,4,5	1,2,3,5	3
4	1,2,3,4,5,6	1,2,3,5,6	4
5	1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,6	5
6	1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,5	6

За умови виконання співвідношення (3.3.2), яке відображає найвищий пріоритет факторів, що мають найбільший вплив на процеси, було визначено такі

пріоритетні фактори комплексного впливу на якість формування шрифту Брайля: 5 і 4 – це є доказом того, що ці фактори мають найвищий пріоритет і впливають на інші процеси і якість створення моделей. Водночас для факторів *якості моделі Брайля* фактори 1 та 2 є пріоритетними.

Наступна ітераційна модель (таблиця 3.3.3) визначатиме пріоритети без урахування факторів та процесів, які в першій ітерації отримали статус, тобто в другій ітераційній моделі буде вилучено 5 та 4 рядки у критерії 1 та рядки 1 і 2 в критерії 2.

Таблиця 3.3.3

Визначення ітерації 2-го ступеня вагомості факторів

$r\gamma$	$A(r\gamma)$	$B(r\gamma)$	$A(r\gamma) \cap B(r\gamma)$
1	2,6	2	2
2	1,2, 6,5	2, 4	4
3	3,4,5,6	3	3
6	4,5,6	4, 6	6

$r\gamma$	$A(r\gamma)$	$B(r\gamma)$	$A(r\gamma) \cap B(r\gamma)$
3	2,3,4,6	3	3
4	1,3,4,6	1,3	3
5	1,2,5	1,5	1
6	2, 5	5	5

Згідно з результатами другої ітерації наступні фактори є під номером S3 – програмного забезпечення слайсерів та S1 – ІС для створення моделей. Для якості моделі Брайля це фактори T3 – відстань між крапками та T6 – роздільна здатність шару.

І для третьої кінцевої ітерації вилучимо фактори, які отримали у другій ітерації, і залишаються такі фактори в таблиці 3.3.4:

Таблиця 3.3.4

Визначення ітерації 3-го ступеня вагомості факторів

$r\gamma$	$A(r\gamma)$	$B(r\gamma)$	$A(r\gamma) \cap B(r\gamma)$
2	2,6	2	2
6	3,4,5,6	6	6

$r\gamma$	$A(r\gamma)$	$B(r\gamma)$	$A(r\gamma) \cap B(r\gamma)$
4	1,3,4,6	4	4
5	1,2,5	5	5

Визначення ітерації 3-го ступеня вагомості факторів ітерація з факторами, які впливають на якість формування шрифту Брайля в адитивному виробництві, – це S2 та S6 і T4 та T4. Узагальнюючи результати 2-го рівня критеріїв (факторів якості моделі Брайля), лінгвістично опишемо, які фактори-властивості найбільше впливають на якість моделі Брайля. Логічною розв’язкою буде завершення ітерації шляхом логічного опису на основі критеріїв із урахуванням попереднього аналізу, проведеного в підрозділі 3.2. Логічні критерії: 1 – важливий; 0.5 – середній, 0 – низький (таблиця 3.3.5):

Таблиця 3.3.5

Фактори та їх ранги

Фактор	Ранг
T1-T2	1
T3-T6	0.5
T4-T5	0

Ітераційні процеси, які ми виконали і які описані в теорії системного аналізу [96], дозволили розв’язати нові завдання щодо визначення пріоритетів та ваги множин факторів: процесів, параметрів, які взаємопов’язані з формуванням шрифту Брайля в адитивному виробництві, включаючи створення цифрових тривимірних моделей у системах CAD. У результаті ми змогли синтезувати

багаторівневу модель (Рис. 3.3.1–3.3.2), що відкриє можливість використання її як основи для отримання числових вагових значень переваг факторів впливу, а також для оптимізації відповідних факторів та процесів.

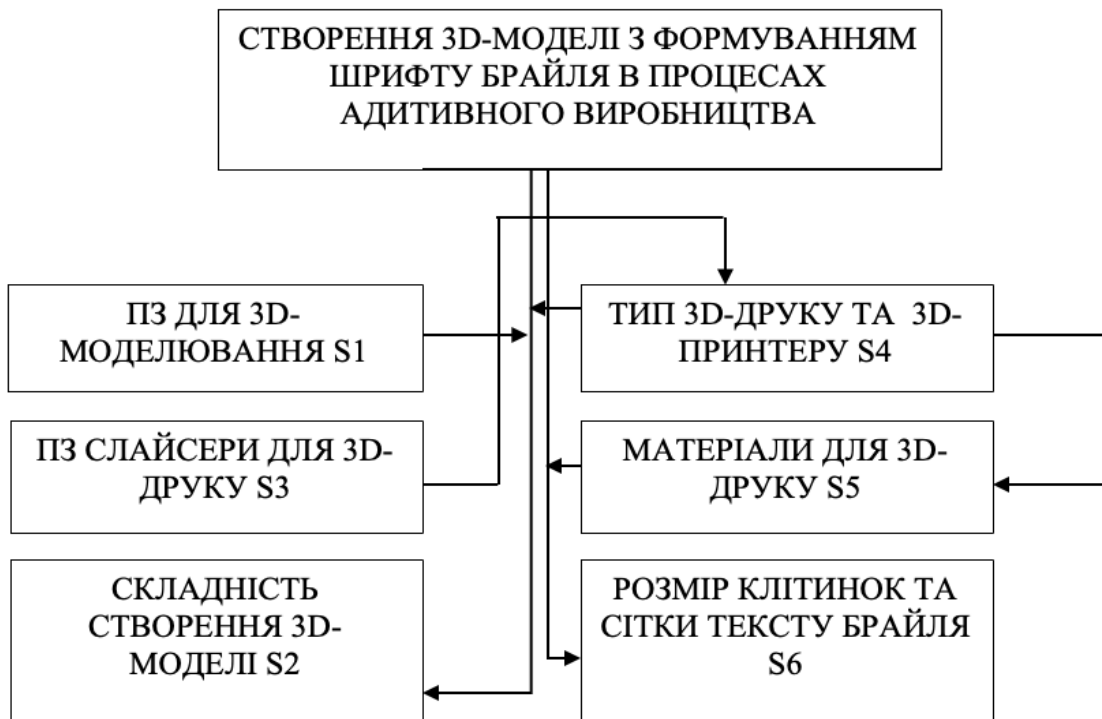


Рис. 3.3.1. Багаторівнева модель факторів процесів виробництва, які впливають на якість формування шрифту Брайля в адитивному виробництві



Рис. 3.3.2. Багаторівнева модель факторів процесів виробництва, які впливають на якість формування шрифту Брайля.

Багаторівневу модель, яка яку представлено на рис 3.3.1 та 3.3.2, отримано на основі проведеного аналізу зв'язків між факторами, процесами в семантичній мережі з урахуванням так званих «абсолютних» залежностей. Водночас семантична мережа містить додаткові фактори, або так звані атомарні предикати, сутність яких окреслена в описах мережі, тому їх важливо враховувати. Подальші дослідження будуть зосереджені на сукупному застосуванні методів ранжування факторів, а також методів визначення вагомості предикатів для отримання кінцевої моделі, що відображатиме пріоритетний вплив процесів і факторів на створення шрифту Брайля в адитивному виробництві.

3.4. Моделі факторів впливу на формування шрифту Брайля в адитивному виробництві із застосуванням ранжування та визначення вагомості предикатів на основі нечіткої логіки.

Головною умовою для отримання точних рангів є розрахунок числових вагових пріоритетів факторів без використання попередньо визначених значень. Для синтезування зазначеної моделі о коротко розглянемо математичне трактування методу ранжування [97, 98].

Нехай N_{ab} – кількість впливів чи залежностей для a типу зв'язку та b фактора або процесу, ($a, b = 1, \dots, na$); M – є вагою для a типу зв'язків. Припустімо, що $a=1$ буде визначати вплив процесів або фактора-джерела на фактор-приймач, $a = 2$ – є залежністю джерела від приймача. Відповідно, для впливів ваги будуть додатними та матимуть такий вигляд: 1 $M_1 > 0$, водночас для залежностей – від'ємними: 2 $M_1 < 0$. Фінальні вагові величини впливу факторів або процесів на якість формування шрифту Брайля в адитивному виробництві разом із врахуванням типів зв'язків будемо визначати через змінну Q_{ab} , її значення обчислюємо обчислимо за таким виразом:

$$Q_{ab} = \sum_{a=1}^2 \sum_{b=1}^z x_{ab} M_1, \quad (3.4.1)$$

z – є умовним фактором або процесом.

Згідно із заявленим передумовами, якщо $Q_{2b} < 0$, то необхідно скоригувати значення, отримані в результаті розрахунків на таку величину:

$$\Delta_b = \max |Q_{2b}|, (b = 1, 2 \dots na)$$

У підсумку отримуємо таку математичну формулу:

$$Q_{wb} = \sum_{a=1}^2 \sum_{b=1}^z (x_{ab} M_1 + \max |Q_{2b}|), \quad (3.4.2)$$

Q_{wb} – підсумкова величина числової міри впливу фактора на процеси.

Кількісні показники для S_{ab} визначено на основі семантичної мережі. Установімо такі умовні значення: $M_1 = 100$, $M_2 = -100$ так званих умовних одиниць. Результати обчислень подано в таблиці 3.5.1 (1 —комплексні процеси; 2 – якість моделі Брайля).

Таблиця 3.5.1

Ранжування факторів на основі попередніх розрахунків

1)Комплексні процеси

<i>a</i>	<i>Sab</i>	<i>S2b</i>	<i>Q_{1b}</i>	<i>Q_{2b}</i>	<i>Q_{wb}</i>	<i>Equal</i>
1	2	2	200	-200	1200	2
2	2	1	200	-100	1200	2
3	3	3	300	-300	1500	1
4	2	3	200	-300	1200	2
5	3	3	300	-300	1500	1
6	3	3	300	-300	1500	1

2) Якість моделі Брайля

<i>a</i>	<i>Sab</i>	<i>S2b</i>	<i>Q_{1b}</i>	<i>Q_{2b}</i>	<i>Q_{wb}</i>	<i>Equal</i>
1	5	1	500	-100	1000	3
2	6	1	600	-100	1100	2
3	5	4	500	-400	800	4
4	6	5	600	-500	1200	1
5	6	5	600	-500	1200	1
6	6	5	600	-500	1200	1

Результати, отримані з використанням методу ранжування [88], не є остаточними і становлять основу для використання методів визначення вагомості предикатів. Вони також не дають змоги здійснити графічну візуалізацію у вигляді моделі. Подальші кроки будуть стосуватись математичного формулювання завдань та побудованого на її основі алгоритму визначення вагомості предикатів [95], що дозволяє встановити фінальні рівні та відповідні їм вагові значення пріоритетності

факторів. Отож визначимо показник впливу предиката у вигляді коефіцієнта вагомості R_{xz} , який відображатиме посилення чи послаблення зв'язків між факторами для x -го типу зв'язку z -предиката. Нагадаємо, що $i=1$ ідентифікує вплив одного фактора на інший, а $i=2$ – залежність. Сукупність предикатів, відображену в описі семантичної мережі, відображену в описі семантичної мережі сукупність предикатів, упорядкуємо в таблиці 3.4.2, що відображатиме відповідні коефіцієнти вагомості.

Таблиця 3.4.2

Лінгвістичні предикати впливу та залежностей

NB	Лінгвістичне трактування предиката (вплив)	R_{1xz}	Лінгвістичне трактування предиката (залежність)	R_{2xz}
1	визначає	4	ґрунтується	4
2	визначає	4	обумовлює	4
3	обумовлює	5	формує	5
4	передбачається	2	формує	2
5	є основою	3	обумовлює	3
6	впливає	4	формує	4

Змінна NB у наведеній таблиці визначено як умовний номер предиката. Фактори семантичної мають взаємозв'язок із певною кількістю зв'язків і предикатів, що їм відповідають. Лінгвістичне трактування предикатів подано у формалізованому описі мережі. З цього випливає необхідність формування для кожного з факторів множини, елементи якої відповідають коефіцієнтам вагомості предикатів. Це, своєю чергою, уможлиблює подальше визначення інтегральних числових визначень вагомості факторів впливу завдяки процесам ідентифікації предикатів.

Отож визначимо множинні коефіцієнти вагомості предикатів таким чином: VAB : A – тип зв'язку; B – будь-який номер фактора. Для A (типу зв'язку «вплив»)

вказуються множини, які стосуються відповідних факторів отримано такі результати:

$$\begin{aligned} S_1 \subset V11 &= \{R_{1,p1}; R_{1,p2}; R_{1,p3}; R_{1,p4}\}; S_2 \subset V12 = \{0\} \\ S_3 \subset V11 &= \{R_{1,p5}; R_{1,p6}; R_{1,p7}; R_{1,p8}\}; S_4 \subset V14 = \{R_{1,p5}; R_{1,p8}\}; \\ S_5 \subset V15 &= \{R_{1,p6}; R_{1,p3}\}; \\ S_6 \subset V16 &= \{R_{1,p7}; R_{1,p4}; R_{1,p2}\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T1 \subseteq V11 &= \{4,3,3\} T2 \subseteq V12 = \{0\} T3 \subseteq V13 = \{3,4,2.5,2.5\} T4 \subseteq V14 = \{4\} T5 \\ &\subseteq V15 = \{4,3\} T6 \subseteq V16 = \{4\} T7 \subseteq V17 = \{3\} T8 \subseteq V18 = \{0\} \end{aligned}$$

Наступним кроком буде встановлення коефіцієнтів значення вагомості на основі таблиці 3.4.2. У результаті отримано такі дані:

$$\begin{aligned} S_1 \subset V11 &= \{2; 3; 3\}; S_2 \subset V12 = \{0\} \\ S_3 \subset V11 &= \{3; 2; 5; 5; 4; 1\}; S_4 \subset V14 = \{6; 4\}; \\ S_5 \subset V15 &= \{3; 4\}; \\ S_6 \subset V16 &= \{R_{1,p7}; R_{1,p4}; R_{1,p2}\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T1 \subseteq V21 &= \{4,3,3\} T2 \subseteq V22 = \{0\} T3 \subseteq V23 = \{3,4,2.5,2.5\} T4 \subseteq V24 = \{4\} T5 \\ &\subseteq V25 = \{4,3\} T6 \subseteq V26 = \{4\} T7 \subseteq V27 = \{3\} T8 \subseteq V28 = \{0\} \end{aligned}$$

На наступному етапі, взявши множини з розрахунків (формула 3.4.3), схожі вирази для всіх факторів процесів, які стосуються типу зв'язку – «залежність», формулюємо для VAB отримуємо такі вхідні дані, де A=2; B=1, ..., 8.

$$\begin{aligned} S_1 \subset V21 &= \{1; 0\}; S_2 \subset V22 = \{0\} \\ S_3 \subset V21 &= \{3; 3; 0; 0\}; S_4 \subset V24 = \{2\}; \\ S_5 \subset V25 &= \{3; 7\}; \\ S_6 \subset V26 &= \{R_{1,p7}; R_{1,p4}; R_{1,p2}\}; \end{aligned}$$

Змінну NB у таблиці визначено як умовний номер предиката. Оскільки до факторів семантичної мережі приєднана певна кількість зв'язків та відповідних їм предикатів, лінгвістичне трактування яких відтворено у формалізованому описі

мережі, логічно сформувані для кожного з факторів множини коефіцієнтів вагомості предикатів. Це в подальшому дозволить розрахувати інтегральні числові значення ваг факторів завдяки цифровій ідентифікації предикатів. Позначимо множини коефіцієнтів вагомості предикатів через M_{IJ} , де I визначатиме тип зв'язку, J – умовний номер фактора. Для типу зв'язку «вплив» множини коефіцієнтів, що відносяться до факторів, матимуть такий вигляд:

$$X_{ab} = \sum_{l=1}^{N_{ab}} \left(\frac{vab_l}{S_{ab}} \right), \quad (3.4.4)$$

де $a = 1, 2; b = 1, 2 \dots 6$; vab – множинні елементи (3.4.3), (3.4.4); S_{ab} – кількісні множинні елементи.

Для того, щоб отримати фінальні вагові значення факторів W_{ab} , їх визначаємо лише після множення пріоритетних факторів Q_{ab} , які представлені в таблиці 3.5, на коефіцієнти X_{ab} . Водночас для типів зв'язків є залежність $M_{1b} < 0$. Числові значення, отримані під час розрахунків, заміняємо на величину.

$$\Delta_b = \max |M_{1b}|, b = 1, 2 \dots 6, \quad (3.4.5)$$

Наступним кроком отримуємо кінцевий вираз для обчислення пріоритетних вагових факторів:

$$W_{zb} = \int \left\{ \sum_{a=0}^2 \sum_{b=1}^6 (x_{ab} Q_{ab} + \Delta_b) \right\}, \quad (3.4.6)$$

Згідно з отриманими результатами за формулою 3.4.6, базуючись на даних таблиці та враховуючи додаткові впливи предикатів 3.4.1, зможемо отримати наступну таблицю (3.4.3): 1) комплексні процеси; 2) якість моделі Брайля:

Таблиця 3.4.3

Вагові значення та пріоритети факторів**1) Комплексні процеси**

b	X_{1b}	X_{2b}	Q_{1b}	W_{1b}	Q_{2b}	W_{2b}	W_{zb}	Ранг	Фактор- пріоритет
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	3.50	5	10	-15	-10	-50	-25	1	5
4	5	2	30	20	-20	0	20	2	4
3	3.33	1.50	70	55	0	0	55	3	3
1	0	0	0	0	-20	-65.8	-65.8	4	2
2	2.67	0.5	60	26.7	0	0	26.7	5	1
6	3	0	20	60	-30	-98.7	30	6	6

2) Якість моделі Брайля

b	X_{1b}	X_{2b}	Q_{1b}	W_{1b}	Q_{2b}	W_{2b}	W_{zb}	Ранг	Фактор- пріоритет
1	3.33	3.33	10	33.3	-10	-33.3	0	1	1
2	0	0	0	0	-10	-33.3	-33.3	2	2
3	3	3	30	90	-10	-33.3	56.7	3	3
4	4	4	40	140	-10	-33.3	106.7	5	5
5	3.50	3.50	20	80	-10	-33.3	46.7	6	6
6	4	4	50	200	-10	33.3	166.7	4	4

Базуючись на даних таблиці 3.4.3, отримаємо уточнені результати завдяки вирахуванню предикатів семантичної мережі багаторівневої моделі пріоритетного впливу факторів та процесів формування шрифту Брайля в процесах адитивного виробництва.



Рис. 3.4.1. Багаторівнева модель факторів формування шрифту Брайля з врахуванням впливу предикатів семантичної мережі

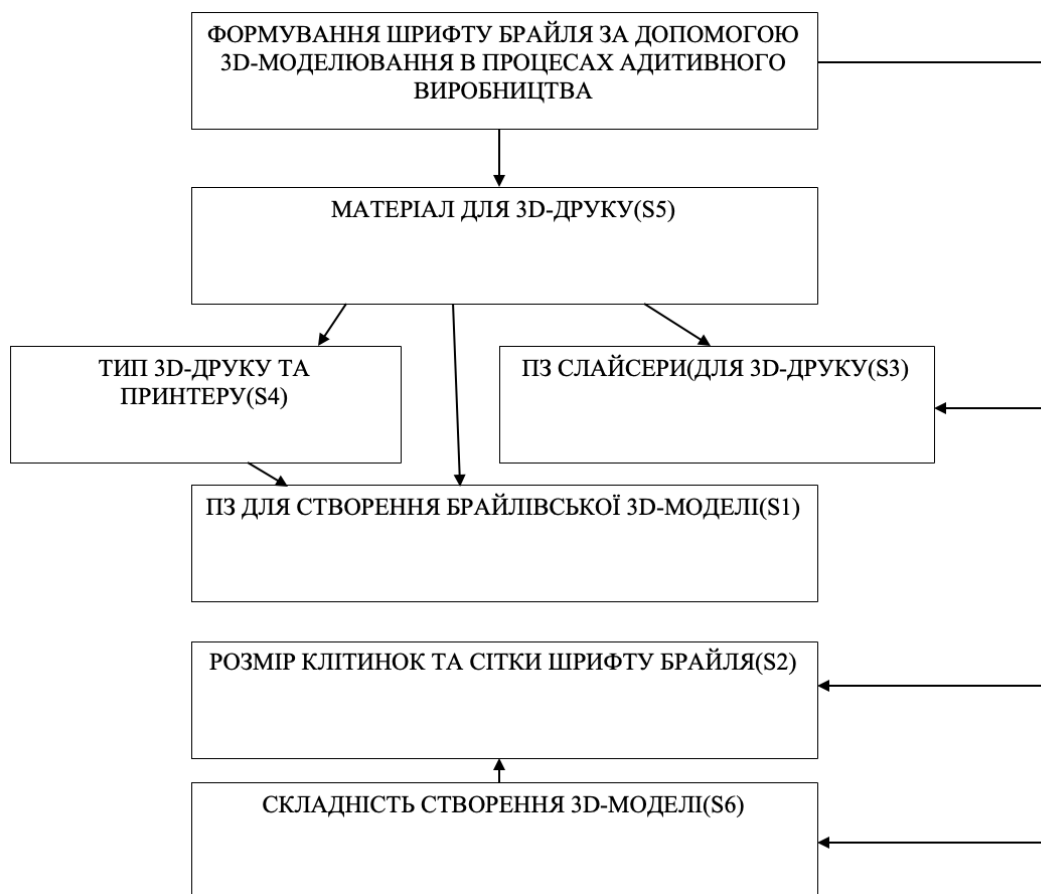


Рис. 3.4. 2. Багаторівнева модель факторів/процесів на формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання в адитивному виробництві з урахуванням впливу предикатів семантичної мережі

У результаті було отримано багаторівневу модель, подібну до моделі 3.3.1, яка підтверджує важливу роль предикатів у семантичній мережі при визначенні пріоритетних факторів. Багаторівнева модель факторів є вихідною інформаційною системою для виконання алгоритмів та розрахунків числових вагових значень факторів процесу з можливістю застосування методів попарних порівнянь, які базуються на квадратно обернених симетричних матрицях попарних порівнянь. Нормалізовані компоненти головної матриці дозволяють отримати точні значення вагових факторів, що є передумовою для синтезування оптимізованої моделі пріоритетного впливу факторів на формування шрифту Брайля в адитивному виробництві [89, 95].

3.5. Оптимізація моделі процесів формування шрифту Брайля та створення 3D-моделей

Основна проблематика полягає у вивченні процесів і факторів, що представлені у вигляді певних етапів виробництва. Кожен процес має свій пріоритет, важливість, певну інформативність, але не відомо, як саме вони впливають один на одного у конкретній ситуації, у якій проводиться аналіз. Ця проблема є однією із ключових частин дисертаційного дослідження, де фактори розглядаються як складові суб'єкта, вимагаючи врахування нестандартних методів і ситуацій. Такий підхід ґрунтується не тільки на теоретичних засадах і дослідженнях а й на застосуванні соціологічних та прикладних методів. Для розв'язання цієї проблематики, пропонується використовувати методи, які ґрунтуються на математичних розрахунках і перевірених принципах, а саме – визначати числові ваги факторів і процесів за допомогою методів попарних порівнянь. Попарні порівняння виконує вузькопрофільний експерт, який оцінює фактор або процес, добре відомий йому, і встановлює пріоритет, переваги, недоліки та вплив фактора на інші процеси й кінцевий результат. Основним інструментом для цього є матриця попарних порівнянь, яка базується на методах числової або радикальної погодженості з урахуванням рівня пріоритетності фактора чи процесу. Результатами розрахунків матриці попарних порівнянь із заданими властивостями допомагають оцінити точність, достовірність та узгодженість результатів порівнянь, що передусім дає змогу отримати адекватні показники з їх зв'язками, представлені в семантичній мережі факторів. [96, 98]. Для здійснення попарних порівнянь буде використано модель 3.4: фактор найвищого рівня порівнюється з фактором першого рівня, перший рівень – з фактором іншого рівня і т.д, поки порівняння не буде проведене для всіх факторів. Якщо фактори розміщені на одному рівні багаторівневої моделі, рішення про перевагу між ними приймається на основі додаткового аналізу семантичної мережі.

Для розв'язання проблематики необхідно застосовувати об'єктивний підхід для встановлення більш точних числових оцінок. Для цього використовується шкала відносної важливості об'єктів, яка в основному застосовується в галузях виробництва, моделюванні та в системному аналізі. Як показано в таблиці, є два фактори – F1 і F2, вони порівнюються між собою за встановленими критеріями. За результатами порівняння їм присвоюється оцінка важливості згідно з рекомендованою множиною, що містить 9 елементів (таблиця 3.5.1).

Таблиця 3.5.1

Шкала відносної важливості

Оцінка важливості	Фактори	Опис
1	Рівнозначні	Переваги відсутні між F1 та F2
3	Один із факторів незначну має перевагу над іншим	Є підстави, що фактор F1 має меншу перевагу над F2
5	Один із факторів має перевагу над іншим	Є підстави, що фактор F1 має перевагу над F2
7	Один фактор має значну перевагу над іншим	Є підстави, що фактор F1 має значну перевагу над F2
9	Один із факторів має найвищу перевагу над іншим	Є підстави, що фактор F1 має найвищу перевагу над F2
2, 4, 6, 8	Компроміс. Проміжні значення	Неможливо визначити. Необхідні додаткові дослідження.

Для виконання попарного порівняння першим кроком є встановлювання факторів за двома критеріями, які будуть внесені до квадратної оберненої симетричної матриці попарних порівнянь $X=(a_{ij})$ – порядок якої відповідає кількості факторів. У результаті заповнюємо верхню половину матриці, вказуючи що $a_{ij} = 1/a_{ji}$, нижня частина матриці буде мати такі елементи: 1/2, 1/6, 1/8, 1/3, 1/5, 1/7, 2, 4, 6, 8 1/9. Несуттєві відмінності: 2, 4, 6, 8 і їх обернені значення. Для проведення попарного порівняння використовується лише 5 рівнів оцінювання: середній, низький, високий, найвищий, абсолютний. З урахуванням проміжних значень отримуємо 9

оцінок. Психологічна межа 7 ± 2 предмети при їх порівнянні забезпечується 9 градаціями відмінностей між ними [106]. Матрицю попарних порівнянь подано в таблиці 3.5.2, яка містить рядки та стовпці з математичними позначеннями факторів. Зауважимо, що кожен фактор елемента S порівнюється з усіма іншими елементами $S \times S$, а кожен рядок елементу a відображає результати порівняння між двома елементами:

1. Якщо елемент-фактор i рівнозначний елементу-фактору j – тоді $a_{ij} = 1$
2. Якщо елемент-фактор i має незначну перевагу над елементом-фактором j – тоді 3
3. Якщо елемент-фактор a_{ij} та є переважним елементом-фактором над j , тоді $a_{ij} = \frac{1}{a_{ij}}$.

Таблиця 3.5.2

Матриця попарних порівнянь факторів

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
S1	1	3	1/2	1/4	1/5	7
S2	1/3	1	1/4	1/5	1/6	6
S3	2	4	1	1/3	1/4	5
S4	4	5	2	1	1/3	3
S5	5	6	4	3	1	2
S6	1/7	1/6	1/5	1/3	1/2	1

Основний матричний вектор попарних порівнянь, де елементи представлені у вигляді вагових числових факторів, базується на двох етапах: 1) перший крок – комплексний аналіз усіх факторів, зокрема тих, що впливають безпосередньо на якість брайлівських моделей, із використанням системи рейтингу Elo; 2) другий крок аналіз факторів за методом Томаса Сааті з урахуванням рекомендацій [95]. Це дозволяє застосовувати систематичний підхід до оцінки кількох факторів одночасно. Порівняння зазвичай здійснюють за «шкалою відносної важливості»,

такою як шкала від 1 до 9, яка слугувала основою для автоматизованого опрацювання матриці з використанням програми «Імітаційне моделювання в системному аналізі методом бінарних порівнянь» [99].

Згідно з теорією матричного аналізу кількість власних векторів симетричної матриці дорівнює її порядку, однак усі вони, крім головного власного вектора, мають нульові значення.

На першому етапі необхідно встановити стартовий рейтинг для всіх факторів-елементів, у такому випадку значення буде – 1000. Надалі, використовуючи відповідну формулу, обчислюємо вихідні очікувані значення, наприклад, для порівняння фактора S1 із фактором S2 і так далі.

$$E_S = \frac{1}{1 + 10^{(R_{Sn} - R_{Si})/400}} \quad (3.5.1)$$

Для автоматизованої обробки напишемо програмний код мовою Python, який виконає розрахунок рейтингових значень (див. додаток Е – програмний код для обчислення рейтингу факторів на основі методу Elo):

Після виконання програми отримано такі вихідні результати:

- S1: 1256.00
- S2: 1152.00
- S3: 1547.00
- S4: 1283.00
- S5: 1366.00
- S6: 1015.00

Отримані результати свідчать про те, що фактор S3 переважає над конкуруючим фактором S5. Для перевірки та коректної ієрархії факторів скористаємося методом Томаса Сааті.

$A(a_1, a_2, a_3 \dots a_n)$ – для визначення головного власного вектора матриці A застосуємо відповідну формулу, яка ґрунтується на обчисленні середніх геометричних компонентів рядків:

$$a_i = \sqrt[n]{a_{i1} * a_{i2} * a_{i3} * \dots a_{ij}} \quad (3.5.2)$$

$$i=1, n$$

Для виконання обчислень матриці попарних порівнянь виконаємо її нормалізацію (див. таблиця 3.5.3). Визначення вагових пріоритетів здійснюється поетапно:

1. 1. Нормалізація кожного стовпця – кожен запис поділено на суму відповідного стовпця. АБО кожен елемент стовпця ділиться на суму відповідного стовпця.
2. Обчислення середнього значення нормалізованих елементів у кожному рядку, щоб отримати вагові коефіцієнти $\sum S$.

Таблиця 3.5.3

Нормалізація значень кожного фактора-елемента

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	2	3	4	5	6	7
S1	0.081	0.156	0.063	0.049	0.040	0.292
1	2	3	4	5	6	7
S2	0.027	0.052	0.032	0.039	0.027	0.250
S3	0.162	0.208	0.126	0.065	0.101	0.208
S4	0.324	0.260	0.252	0.195	0.134	0.125
S5	0.405	0.312	0.504	0.586	0.403	0.083
S6	0.014	0.017	0.025	0.065	0.202	0.042

Розрахунок середніх значень факторів-елементів і суми геометричних значень здійснюватиметься за такою формулою:

$$S1_{average} = \frac{S1 + S2 + S3 + S4 + S5 + S6}{6}, \quad (3.5.3)$$

$$S1_{average} = 0.092; S2_{average} = 0.045; S3_{average} = 0.131 S4_{average} = 0.215; S5_{average} = 0.306; S6_{average} = 0.039$$

$$\sum S_n = 0.828$$

На основі отриманих значень виконаємо наступний крок нормалізації векторів. Для цього використаємо формулу:

$$x_{i_{norm}} = \frac{\sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdots a_{ij}}}{\sum_{i=0}^n \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdots a_{ij}}} \quad (3.5.4)$$

Таблиця 3.5.4

Середнє значення нормалізованих факторів-елементів

Factor-Element	N _{average}
S1	0.111
S2	0.054
S3	0.158
S4	0.260
S5	0.370
S6	0.047

Відтепер отримано нормалізований вектор $X_{norm} = \{0.111; 0.054; 0.158; 0.260; 0.370; 0.047\}$, у результаті чого розв'язано головне завдання, основною якого було визначення вагових факторів, що характеризують рівень їх впливу на якість формування шрифту Брайля в процесах адитивного виробництва. Для зручності

відображення значень помножимо їх на коефіцієнт $k = 1000$, отримуючи такі значення:

$$X_{norm} \times k = \{111; 54; 158; 260; 370; 47\}$$

Згідно з отриманими результатами побудуємо ієрархічну модель пріоритетних факторів-елементів – від найвищих до найнижчих – на основі вихідних значень пріоритетних вагових факторів:

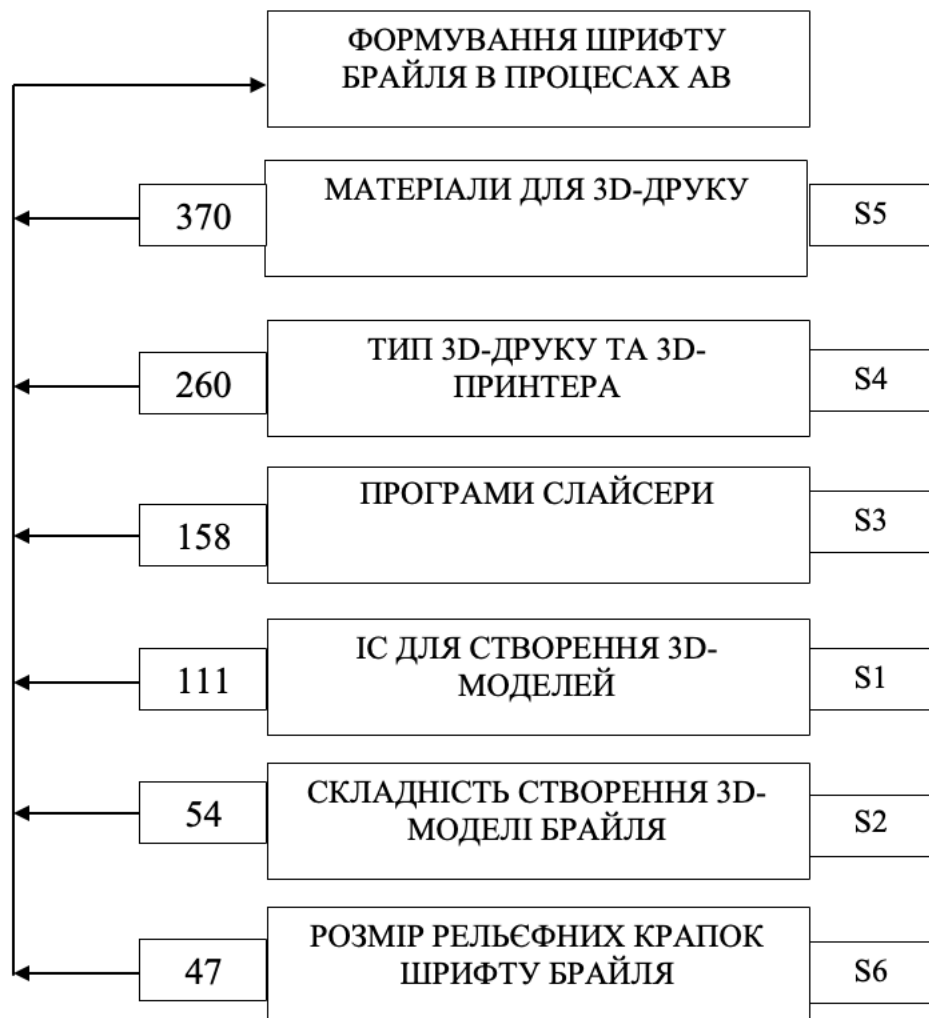


Рис. 3.5.1. Оптимізована модель 1-го рівня факторів процесів формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання з використанням технології адитивного виробництва

Метод вирішення є ключовим етапом, який допомагає встановити пріоритети факторів на основі отриманих значень із метою необхідної перевірки узгодженості числової ієрархії факторів. У цьому випадку матрицю попарних порівнянь A справа множимо на вектор $X_{\text{норм}}$, щоб отримати вектор $X_{\text{норм1}}$

$$X_{\text{norm1}} = (0.616; 0.342; 0.749; 1.151; 1.388; 0.197)$$

Далі покомпонентне ділення вектора $X_{\text{норм1}}$ на $X_{\text{норм}}$ для отримання $X_{\text{норм2}}$:

$$X_{\text{norm2}} = (5.550; 7.600; 13.870; 8.790; 8.790; 5.051|x) =$$

$$\Rightarrow \lambda_{\text{max}} = 8.275$$

Проміжний критерій λ_{max} – є максимальним значенням додатної обернено-симетричної матриці A , яке отримано як середнє значення компонента вектора. Для оцінки достовірності результатів використаємо індекс узгодженості (SC):

$$SC = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} = 0.455$$

де $n = 6$. Згідно з формулою 3.5.9 отримуємо значення індексу узгодженості ($SC=0.455$). Далі необхідно визначити відношення індексованості (індекс випадковості) – це стандартне значення, яке залежить від різних факторів, а отже, встановимо значення для індексу випадковості ($RI = 1.24$)

$$0.455 < 1.24 \times 0.1 = 0.124$$

$$CR = \frac{6.582}{1.24} = 0.367$$

Отримані результати свідчать про необхідність звуження критеріїв. Дійдемо висновку, що розглядати комплексний метод не є оптимальним. Для цього зосередимось на факторах, які безпосередньо впливають на кінцеву якість брайлівських 3D-моделей. Отже, визначимо ключові фактори-елементи, які впливають саме на кінцеву якість формування шрифту Брайля:

- Висота крапки (T1): висота крапок Брайля має вирішальне значення для тактильного відгуку та читабельності.

- Діаметр крапки (T2): діаметр крапок Брайля має відповідати стандартам Брайля для легкого розпізнавання на дотик.
- Відстань між крапками (T3): правильна відстань між крапками забезпечує чіткість і запобігає змішуванню, що може вплинути на читабельність.
- Довговічність матеріалу (T4): довговічність матеріалу впливає на експлуатаційні характеристики моделі Брайля, особливо при частому тактильному використанні.
- Оздоблення поверхні (T5): гладка поверхня покращує читабельність, зменшуючи тертя та різкість навколо крапок Брайля.
- Роздільна здатність шару (T6): вища роздільна здатність шару (менша висота шару) збільшує чіткість крапок Брайля, покращуючи читабельність.

Таблиця 3.5.5

Значення факторів-параметрів шрифту Брайля

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
T1	1	3	2	5	6	4
T2	1/3	1	3	4	5	2
T3	1/2	1/3	1	4	5	3
T4	1/5	1/4	1/4	1	2	1/2
T5	1/6	1/5	1/5	1/2	1	1/3
T6	1/4	1/2	1/3	2	3	1

Записавши значення матриці з таблиці 3.5.5 (якість моделі Брайля) у програмний код, виконаємо аналіз за допомогою Python на основі рейтингового методу Elo. Отримані результати після запуску скриптів відображають такий рейтинг.

1. Висота крапки (1525.00) – T1
2. Діаметр крапки (1367.00) – T2
3. Відстань між крапками (1338.00) – T3
4. Оздоблення поверхні моделі (1149.00) – T5

5. Роздільна здатність шару (1055.00) – T6

6. Довговічність матеріалу (1003.00) – T4

Тепер перевіримо коректність цього рейтингу за допомогою методу Сааті:

Таблиця 3.5.6

Нормалізація значень кожного фактора-елемента

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
T1	0.41	0.57	0.29	0.30	0.27	0.37
T2	0.13	0.19	0.44	0.24	0.23	0.18
T3	0.20	0.06	0.15	0.24	0.23	0.28
T4	0.08	0.05	0.04	0.06	0.09	0.05
T5	0.07	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03
T6	0.10	0.09	0.05	0.12	0.14	0.09

Таблиця 3.5.7

Середнє значення нормалізованих факторів-елементів

Factor-Element	Naverage
T1	0.38
T2	0.24
T3	0.19
T4	0.06
T5	0.04
T6	0.10

Для кращої читабельності значень помножимо їх на коефіцієнт $k = 1000$, у результаті чого отримуємо такі значення:

$$X_{norm} \times k = 380; 240; 190; 60; 40; 100$$

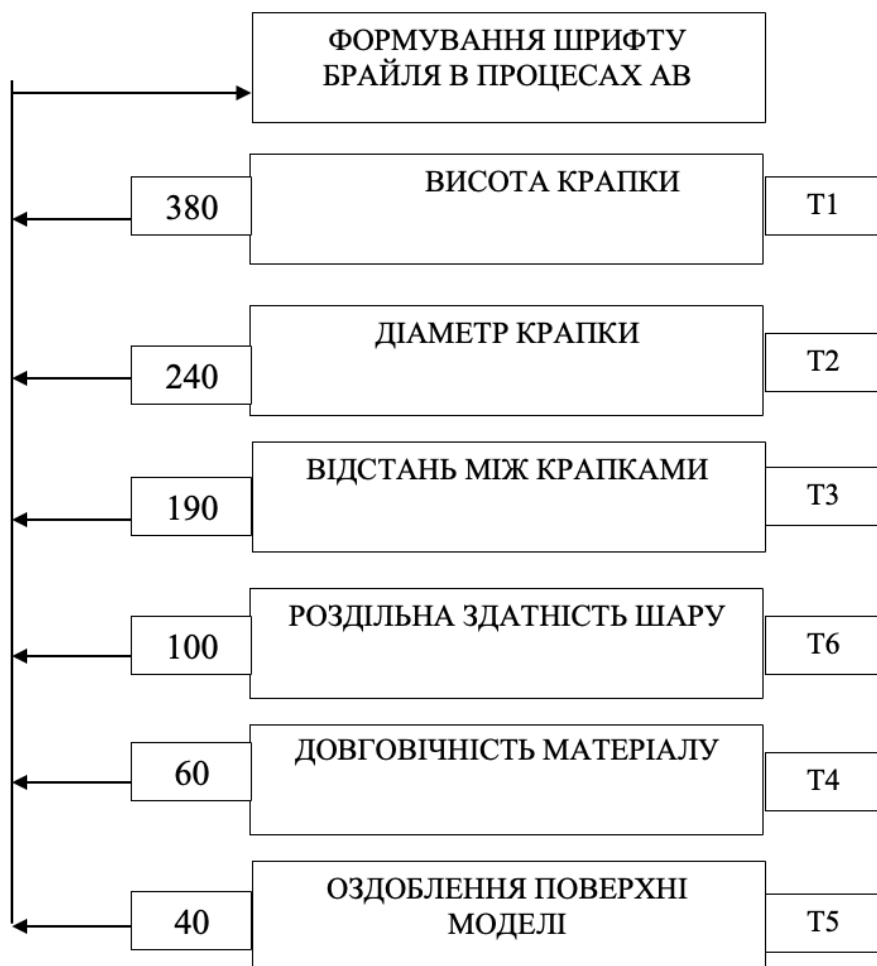


Рис. 3.5.2. Оптимізована модель 2-го рівня критерії факторів процесів формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання з використанням технології адитивного виробництва

$$T1 \approx 2.8$$

$$T2 \approx 1.87$$

$$T3 \approx 1.53$$

$$T4 \approx 0.34$$

$$T5 \approx 0.21$$

$$T6 \approx 0.88$$

$$\sum T_n = 7.63$$

$$T1 \approx 0.38; T2 \approx 0.24; T3 \approx 0.19; T4 \approx 0.06; T5 \approx 0.04; T6 \approx 0.10$$

$$\begin{aligned}
 X_{norm1} &= (3.19; 1.73; 1.44; 0.34; 0.21; 0.74) \\
 X_{norm2} &= (8.39; 7.21; 7.58; 5.67; 5.25; 7.40) = \\
 &\Rightarrow \lambda_{max} = 6.33 \\
 TC &= \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = 0.066 \\
 CR &= \frac{0.066}{1.24} = 0.053
 \end{aligned}$$

У даній реалізації значення CR не перевищує стандартного значення 0.10. Це свідчить про те, що отримані вихідні дані застосований метод нормалізації факторів-елементів властивостей Брайля досягли прийнятного рівня адекватності, враховуючи варіативність та особливості кожного фактора.

Таблиця 3.5.8

Елементи та еталонне значення

Кількість елементів	Еталонне значення
1	0
2	0
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24

$$0.066 < 1.24 \times 0.1 = 0.124$$

$$CR = \frac{SC}{RI} = \frac{0.066}{1.24} = 0.10$$

За отриманими даними маємо $0,09 < 0,1 \times 1,24$ з похибкою 0.1, що свідчить про адекватність результатів, при цьому виконується умова $IU < WI \times 0.1$

На завершення можна стверджувати, що результати опрацювання матриці попарних порівнянь відповідають згаданим вище критеріям, що свідчить про достатньо високий рівень узгодженості процесу. Таким чином, маємо належну

узгодженість оцінок стосовно попарних порівнянь факторів, відображених у відповідній матриці [106].

Розроблене дослідження сформувало моделі пріоритетних впливів на основі виокремлених факторів, що впливають на процеси формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання. Визначено фактори як комплексного методу виробництва – від створення цифрової 3D-моделі до друку, так і властивості тексту шрифтом Брайля на 3D-моделях. Фактори першого рівня отримано методами моделювання ієрархій та матрицями досяжностей, подальші етапи виконувались із застосуванням методів ранжування факторів із урахуванням вагомих коефіцієнтів предикатів семантичних мереж. Фінальні значення отримані шляхом покрокових обчислень із використанням методів числової погодженості. Відтепер можна побудувати порівняльну таблицю та графічне відтворення вагових значень факторів, отриманих різними методами. У таблиці значення компонента X_0 встановлюється на основі моделей, поданих на рис. 3.5.1–3.5.2, з кроком – 40:

Таблиця 3.5.9

Варіанти вагових значень із різними методами

	1	2	3	4	5	6
Метод аналізу ієрархій, вектор X_0	180	100	200	400	160	120
1-Метод ранжування, вектор X_2	370	260	158	111	54	47
2-Метод числової погодженості, вектор X_2	380	240	190	60	40	100

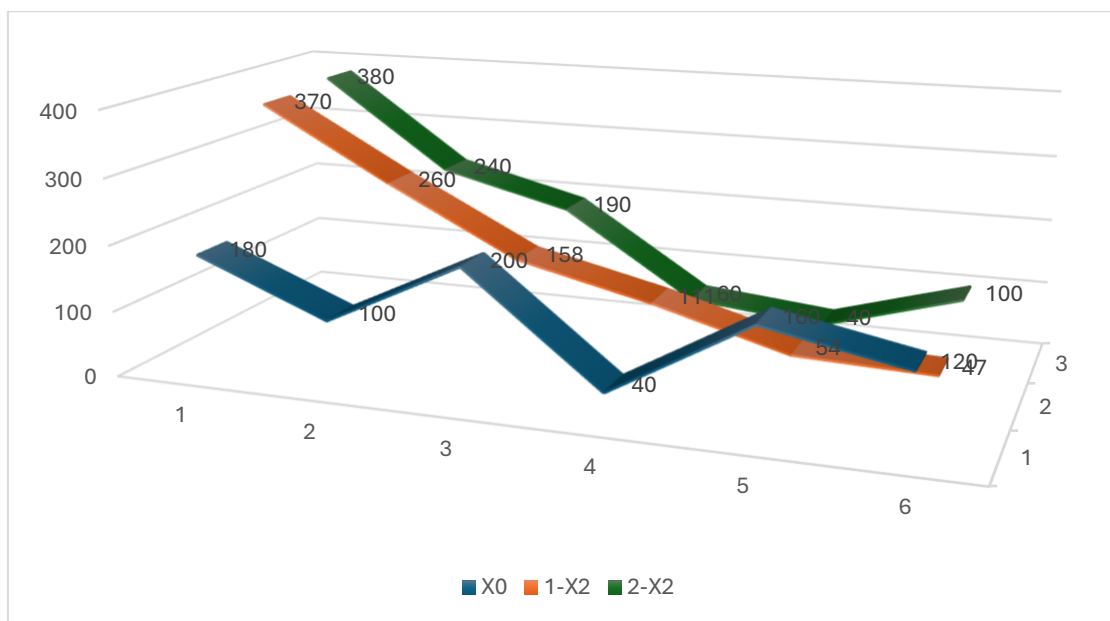


Рис. 3.5.3. Гістограма вагових значень факторів формування шрифту Брайля

Наведена гістограма свідчить про високий рівень узгодженості вагових значень факторів, що впливають на формування шрифту Брайля. Водночас щодо процесів адитивного виробництва спостерігається певна неузгодженість. Це зумовлено тим, що зазначені процеси розглядались як єдине ціле, для вирішення цієї проблеми доцільно аналізувати кожен процес окремо. У цьому контексті варто зазначити, що дисертаційне дослідження не має на меті охопити всі фактори та процеси – від створення тривимірних моделей до післядрукарських етапів. З іншого боку, дослідження виявило проблему забезпечення узгодженості між усіма одночасними процесами виробництва, необхідними для створення брайлівських 3D-моделей. Це доводить, що комплексний підхід – від створення тривимірних моделей до 3D-друку – ускладнює оптимізацію моделі факторів. Тому для ефективного вирішення цієї проблеми кожен процес необхідно розглядати як окремий фактор, деталізований на підфактори. Саме такий підхід був реалізований при оптимізації моделі факторів, які безпосередньо впливають на якість тексту шрифтом Брайля на тривимірних моделях.

3.6. Аналітичний прогноз та варіанти формування шрифту Брайля на 3D-моделях в адитивному виробництві на основі методів лінійного згортання

Фактори, що впливають на окремі процеси розроблення тривимірної моделі шрифту Брайля, можуть бути подані у вигляді багаторівневої моделі, сформованої в підрозділі 3.5 як попередній результат розв’язання більш загального завдання. Це завдання полягає в оцінюванні відсотка ефективності факторів, що діють сукупно, на окремі процеси для забезпечення належної якості виконання. Кількість таких факторів може бути значною, тому складно визначити єдиний метод досягнення очікуваного ефекту, а тому необхідно знаходити оптимальні рішення за допомогою наближених методів. Водночас отримані таким чином рішення належать до визначених та оцінених рішень, оскільки вони відповідають певним критеріям адекватності.

Одне зі схожих за суттю завдань потребує альтернативного підходу до побудови та обчислення оптимальних рішень, що ґрунтується на критеріях узгодженості і правильності обраних рішень [100].

Витрати на обчислення можна зменшити, застосовуючи принцип, який висловив італійський економіст Парето. Цей принцип передбачає, що для дослідження доцільно обрати лише обмежену кількість факторів, базуючись на рівності рівнів відносної важливості певного фактора. У нашому випадку йдеться про два критерії з набором різних факторів, визначених на основі оптимізованої моделі (рис. 3.5.1–3.5.2). Принцип Парето демонструє, що непропорційне покращення результатів можна досягти шляхом ранжування різних причин проблеми і концентрації на тих факторах, які мають найбільший вплив, з метою отримання необхідних даних для встановлення пріоритетів.

Щоб аналітично спрогнозувати створення шрифту Брайля на 3D-моделях в адитивному виробництві, необхідно розглянути кілька ключових факторів і їх

математичне представлення. Основна мета – перетворити шрифт Брайля на серію рельєфних крапок на 3D-поверхні, забезпечуючи правильні розміри, розташування та відстані для точного тактильного сприйняття. Також слід врахувати всі етапи адитивного виробництва – від створення цифрової 3D-моделі до друку на 3D-принтері.

Фактори впливу, поділені на два критерії, враховуються для формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання з використанням прогностичного аналізу:

Критерій 1: Якість шрифту Брайля

1. Висота крапки (T1)
2. Діаметр крапки (T2)
3. Відстань між крапками (T3)
4. Роздільна здатність шару (T4)
5. Довговічність (T5)
6. Поверхневе оздоблення тактильної моделі (T6)

Критерій 2: Процеси виробництва

1. Програми для 3D-моделювання (S1)
2. Складність тексту (S2)
3. Слайсер (S3)
4. Тип друку 3D та 3D-принтера (S4)
5. Матеріали для 3D-друку (S5)
6. Розмір клітинок Брайля та сітки (S6)

Взявши до уваги отримані значення X_{norm} в частині підрозділу 3.6, для зручності, сформуємо таблицю зі значеннями:

Таблиця 3.6.1

Фактори і їх нормалізоване значення

FACTOR	X_{norm}
S1	111
S2	54

Продовження таблиці 3.6.1	
S3	158
S4	260
S5	370
S6	47
T1	380
T2	240
T3	190
T4	60
T5	40
T6	100

Наступним кроком підсумуємо загальний внесок кожного критерію (1 та 2) з відповідним набором факторів.

$$\sum S_{total} = 111 + 54 + 158 + 260 + 370 + 47 = 1000$$

$$\sum T_{total} = 380 + 240 + 190 + 100 + 60 + 40 = 1010$$

Як бачимо, перший критерій переважає. Для відображення вагового внеску кожного фактора у відсотках розрахуємо його за такою формулою:

$$S_p = \frac{X_{norm}}{S_{total}} \times 100 T_p = \frac{X_{norm}}{S_{total}} \times 100 S1_p = 11.1\%; S2_p = 5.4\%; S3_p = 15.8\%; S4_p = 26.0\%; S5_p = 37.0\%; S6_p = 4.7\%$$

$$T1_p = 23.76\%; T2_p = 18.81\%; T3_p = 37.62\%; T4_p = 5.94\%; T5_p = 3.96\%; S6_p = 9.90\%$$

Далі ітераційно розрахуємо процентні внески з урахуванням впливу кожного фактора за такою формулою:

$$\sum A_{FJ} = FJ_p; A_{FI} = A_{FJ} + FJ_p; \quad (3.6.1)$$

де A_{FJ} – сума процентного внеску фактора; FJ_p – ваговий внесок фактора (формула 3.6.1)

$$\sum A_{S1} = 89.9\%; A_{S2} = 95.3\%; A_{S3} = 78.8\%; A_{S4} = 63.0\%; A_{S5} = 37.0\%; A_{S6} = 100.00\%$$

$$\sum A_{T3} = 37.62\%; A_{T1} = 61.38\%; A_{T2} = 80.19\%; A_{T6} = 90.09\%; A_{T4} = 96.03\%; A_{T5} = 100.00\%$$

Для зручності відобразимо результати отриманих значень процентних внесків та значень на основі моделі 3.5.6 у порівняльній таблиці:

Таблиця 3.6.2

Фактори процесів адитивного виробництва і їх вплив у відсотковому відношенні

Фактори	Вагове значення	Процентний внесок	Накопичувальний процентний вплив
S1	111	11.1	89.9
S2	54	5.4	95.3
S3	158	15.8	78.8
S4	260	26.0	63.0
S5	370	37.0	37.0
S6	47	4.7	100.00

Таблиця 3.6.3

Фактори характеристик шрифту Брайля і їх вплив у відсотковому відношенні

Фактори	Вагове значення	Процентний внесок	Накопичувальний процентний вплив
T3	380	37.62	37.62
T1	240	23.76	61.38
T2	190	18.81	80.19
T6	100	9.90	90.09
T4	60	5.94	96.03
T5	40	3.96	100.00

Згідно з отриманими результатами можна дійти висновку щодо пріоритетних факторів впливу.

Для першого критерію це такі фактори:

- S5 – матеріали для 3D-друку
- S4 – тип друку 3D та 3D-принтера
- S3 – слайсер

Для другого критерію це такі фактори:

- T3 – відстань між крапками
- T1 – висота крапки
- T2 – діаметр крапки

Вищенаведені фактори є стратегічно важливими у процесах адитивного виробництва для формування шрифту Брайля та суттєво впливають на якість тексту шрифтом Брайля на 3D-моделях. Підсумовуючи результати цього розділу, отримано практичне значення теоретичних засад інформаційної концепції дослідження процесів, що характеризуються критеріальними факторами, які впливають на якість кінцевої моделі. Особливо вагомим у цьому контексті є визначення пріоритетних варіантів реалізації процесів виробництва, які

потребують концентрації уваги для оптимізації. Результати розділу стануть вагомим внеском у розроблення інформаційних технологій для оптимізації технологій 3D-моделювання та процесів адитивного виробництва у формуванні шрифту Брайля.

Висновки до розділу 3

1. Створено інформаційну концепцію дослідження процесів формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання, базуючись на двох критеріях, а саме: 1) процеси створення 3D-моделей із формуванням шрифту Брайля в адитивному виробництві; 2) фактори, які впливають на якість тексту шрифтом Брайля на 3D-моделях. На основі цих критеріїв та інформаційних технологій виконано покрокове опрацювання факторів і процесів, результати якого відображені в запроєктованій багаторівневій моделі, що включає: 1) критеріальне створення семантичної мережі зв'язків між факторами та процесами; 2) розробку моделей пріоритетних факторів, які впливають на якість створення тривимірних брайлівських моделей; 3) формування альтернативних та розрахунок оптимальних варіантів реалізації; моделювання компонент нечіткої системи прогностичного оцінювання; розроблення інформаційної технології пріоритетних факторів впливу.
2. Формалізовано відображення взаємозв'язків між факторами процесів адитивного виробництва та факторами якості тексту шрифтом Брайля на 3D-моделях. Це реалізовано шляхом побудови семантичної мережі, у якій вершини відповідають факторам процесів, а дуги передають лінгвістичну суть їхніх зв'язків із використанням елементів логіки предикатів. Такий підхід забезпечує можливість застосування математичного апарату теорії моделювання для вивчення особливостей впливу вказаних факторів.
3. Розроблено багаторівневу модель факторів впливу на основі методу математичного моделювання ієрархій, в основі якого – матриця досяжності,

побудована на базі семантичної мережі, а також ітераційні таблиці для визначення рівнів важливості факторів.

4. Синтезовано удосконалену багаторівневу модель факторів на основі методу ранжування та методу визначення вагомості предикатів. Ітераційний процес її створення передбачає отримання варіантів на основі числа впливів (з вагою $1w = 10$) і залежностей (з вагою $2w = -10$) між факторами.

5. Виконано оптимізацію вагових значень факторів на основі матриці попарних порівнянь, побудованої за шкалою відносної важливості об'єктів з урахуванням моделі, отриманої на попередньому етапі. Опрацювання матриці дало змогу визначити оптимальні вагові значення факторів: 1) перший критерій: $\max \lambda = 8,275$; індекс узгодженості $SC = 0,455$; відношення узгодженості $CR = 0,367$; 2) другий критерій: $\max \lambda = 6,33$; індекс узгодженості $TC = 0,066$; відношення узгодженості $CR = 0,053$. На основі отриманих даних синтезовано оптимізовану модель пріоритетного впливу факторів.

6. Сформовано та розраховано модель впливу факторів на основі методу Парето з урахуванням процентних накопичувальних внесків. Визначено найбільш впливові фактори за величиною їхнього процентного внеску.

Розділ 4.

РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ 3D-МОДЕЛЕЙ З ТЕКСТОМ БРАЙЛЯ, НА ОСНОВІ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Створення інформаційної технології формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання в процесах адитивного виробництва для використання у сфері інклюзії людей із порушеннями зору та незрячих насамперед передбачає проведення дослідження із застосуванням прогностичного оцінювання процесу створення тактильних моделей зі шрифтом Брайля в адитивному виробництві. Дослідження також включатиме формування інтегровальних показників, які представлені у вигляді числових виразів, що відображають рівень якості. З огляду на суть завдання дослідження та потребу в прогнозуванні, тобто використання вихідних баз даних в описовій формі доцільно застосовувати перевірені засоби теорії нечітких множин, зокрема на прикладному рівні – методи нечіткої логіки. Основним принципом при використанні нечіткої логіки виступатиме принцип Заде, який є достатньо розвиненим і широко застосовується в наукових дослідженнях [97].

Головним параметром, який використовується в нечіткій логіці, є лінгвістична змінна (ЛЗ), яка, на відміну від математичних змінних та параметрів, описується словами, доступною мовою. У результаті множини можливих значень лінгвістичної змінної (ЛЗ) утворюється терм-множина, елементи якої є терми. Особливістю лінгвістичної змінної є функції належності (ФН), які формуються на основі значень терм множин, а також лінгвістичних змінних (термів) (ЛТ). Такі терми властиві певним факторам або процесам як частина технічного або, у цьому випадку, виробничого процесу. Терм-множина (стандартна множина) зазвичай є числовою або умовною – у разі відсутності числових параметрів. Відповідно до цього межі лінгвістичних змінних, лінгвістичні терми описуються звичайним текстом як дискретні стани ЛЗ на певних рівнях поділу області визначення або

стандартної шкали значень. Лінгвістичні змінні можуть оцінюватися методами, а саме за допомогою якісних текстових характеристик, тобто читабельними якісним лінгвістичними термами, наприклад: «складний», «простий» – для визначення типу тексту шрифтом Брайля; «рідкий», «твердий», «полімер» – для визначення типу матеріалів для 3D-друку; «професійний», «стандартний» – для оцінювання рівня програмного забезпечення для 3D-моделювання і т. п.

4.1. Алгоритми та методи оцінювання якості 3D-моделей із рельєфно-крапковим шрифтом Брайля

На основі теорії нечітких множин визначимо математичні лінгвістичні змінні, наведені в попередніх розділах, за винятком інформаційної системи для 3D-моделювання (S1), оскільки цей фактор не залежить від вибору технологій 3D-друку для формування шрифту Брайля, та основним критерієм вибору програмного забезпечення є його функціональність, як уже було розглянуто в 1–2 розділах дисертації.

Допустимо, що універсальна нечітка множина – A , яка визначає загальні області значень змінних. Для досягнення результатів та реалізації поставлених завдань виокремимо частину нечіткої множини, а саме нечіткої підмножини B , яку можна подати у такому вигляді:

$$B = \{(\beta_B(a), a), a \in A\}, \quad (4.1.1)$$

β_B – функція належності; $0 \leq \beta_B \leq 1$.

Функція належності β_B є зв'язком між елементами нечіткої підмножини B та універсальної множини A . Допустимо, що вихідна основна шкала поділена на певні частини відрізки, тоді множину B можна подати у вигляді, який відображає функції належності як носіїв нечітких форматів із вхідними значеннями лінгвістичних змінних:

$$B = (\beta_B(a_1)/a_1, \beta_B(a_2)/a_2, \dots, \beta_B(a_n)/a_n = \quad (4.1.2)$$

$$\sum_{i=0}^n \beta_b(a_i)/a_i,$$

Спростимо вираз до такого вигляду, що містить сукупність пар β_b та a_i , зберігаючи, що функції $\beta_b(a_n)$ є співвідношенням математичної змінної a_i :

$$B = \sum_{i=0}^n \beta_b / a_i, \quad (4.1.3)$$

Процеси формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання в адитивному виробництві є досить складними та характеризуються великою кількістю множин вхідних значень і параметрів, а саме чинників та факторів, які впливають на формування текстів шрифтом Брайля на різних етапах адитивного виробництва. Опишемо це як множину $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, яка була описана в попередньому розділі. На етапах перетворень над факторами та процесами цієї множини можна отримати результативну змінну, яка встановлює рівень якості брайлівської тактильної моделі в процесах адитивного виробництва. У процесах досліджень задекларовані лінгвістичні та математичні змінні отримують числові значення на певних проміжках за попередньо визначеною шкалою. Це дає можливість припустити наявність мінімальних (нижніх) та максимальних (верхніх) значень, залучених у процесах формування змінних, що представлено в такому вигляді [101]:

$$\underline{S} = P(\underline{x}_i); S(\overline{x}_i); i = 1, 2, \dots, 6. \quad (4.1.4)$$

Фактори множини $x = \{x_1, x_2, \dots, x_6\}$ у процесі формування шрифту Брайля в адитивному виробництві на тривимірних моделях у загальному формулюванні завдання розглядають як якісні змінні, що зумовлює потребу у визначенні терм-множин значень цих факторів з одночасним встановленням їхніх параметричних меж. Для множини A отримуємо:

$$A = \{a^{(1)}, a^{(2)}, \dots, a^{(j)}\}, \quad (4.1.5)$$

$a^{(k)}$, $k = \overline{1, j}$ – це множина, яка визначає процеси універсальної множини бази значень, у цьому випадку максимальне значення становить 10. Тоді фінальну змінну, яка відображає результати даних і рівень якості формування шрифту Брайля можна отримати у вигляді умовних одиниць із частковим записом певних значень:

$$S = \{s^{(1)}, s^{(2)}, \dots s^{(l)}\}, \quad (4.1.6)$$

де $s^{(l)}$ – множина встановлених нечітких термів для ЛЗ S , причому її кількість становить 5 ($l=5$).

Визначені нами множини (4.3)–(4.5) стосуються лінгвістичних змінних, а саме:

- факторів і процесів, які впливають на якість формування шрифту Брайля в процесах адитивного виробництва (3D-моделювання та 3D-друк). Їхнє початкове призначення полягає у визначенні якісних термінів, на основі яких отримуємо числові умовні бали. Це зручно використовувати для формування початкової бази нечітких матриць знань, які поєднують лінгвістичні змінні з метою визначення результатів реалізації відповідного процесу. При цьому застосовуються логічні конструкції типу: «якщо–то–інше», «якщо–або–тоді–інше», «якщо–і–тоді». Наступним кроком є побудова системи нечітких логічних рівнянь, розв’язання яких здійснюється на основі умов (4.1.6, 4.1.7), внаслідок чого функції належності набувають числових значень, що дає змогу виконувати розрахунок інтегрального показника рівня якості сформованого тексту Брайля на 3D-моделях як завершального етапу дослідження. На етапі розв’язання нечітких логічних рівнянь застосовуються такі правила:
 - Коли значення двох функцій належності, наприклад β_1 та β_2 , визначаються за логічними правилами ($\leq, \geq, <, >, =$), фінальне рішення приймається на основі таких умов:

$$\beta_1 \vee \beta_2 = \max(\beta_1, \beta_2) = \begin{cases} \beta_1 IF \beta_1 \geq \beta_2 \\ \beta_2 IF \beta_1 < \beta_2 \end{cases}$$

$$\beta_1 \wedge \beta_2 = \min(\beta_1, \beta_2) = \begin{cases} \beta_1 IF \beta_1 \leq \beta_2 \\ \beta_2 IF \beta_1 > \beta_2 \end{cases}, \quad (4.1.7)$$

Для досягнення поставленої мети в межах цього підрозділу необхідно здійснити низку процедур, а саме: групування етапів формування шрифту Брайля у процесах 3D-моделювання та адитивного виробництва одночасним урахуванням факторів, представлених у вигляді лінгвістичних змінних. Ці змінні є важливими для забезпечення якості виконання окремих процедур та етапів. Для визначення незалежних факторів доцільно здійснити їх поділ за функціональним спрямуванням лінгвістичних змінних (ЛЗ), що зумовлені вимогами процесів адитивного виробництва у створенні тактильних моделей із використанням 3D-моделювання. Крім того, структуризацію факторів здійснено за ієрархічним принципом, що уможливить застосування засобів і методів теорії багаторівневих ієрархічних систем для дослідження й обґрунтування адекватності та достовірності отриманих результатів [102].

Ключовими факторами та правилами, які враховуватимуться під час групування, є такі варіанти:

- Якість сформованого шрифту Брайля на 3D-моделі. Мається на увазі відсутність суттєвих дефектів на тактильних моделях, які можуть виникнути на етапі 3D-друку або під час післядрукарських процесів і вплинути на якість рельєфних крапок на моделях (D).
- Здатність незрячої людини зчитувати інформацію з тактильної моделі. Важливими критеріями є розмір крапок, тип матеріалу, складність тексту (Q).
- Зносостійкість тактильної моделі (R).

На основі визначених груп факторів можливо сформувати фінальну лінгвістичну змінну, що дозволить ідентифікувати інтегральний показник якості

брайлівської 3D-моделі, де Q, R, D – є аргументами функції другого рівня.

$$S = E_s(Q, R, D), \quad (4.1.8)$$

Q – ЛЗ, яка визначає функцію оцінки якості сформованого шрифту Брайля та враховує недоліки, які виявляє сам виробник на різних етапах процесів виробництва. Цю процедуру можна подати у вигляді:

$$Q = E_s(q_1, q_2), \quad (4.1.9)$$

де q_1 – параметри слайсера (температура, відсоток заповнення, швидкість друку, наявність опорів, товщина шару основи) – S3; q_2 – параметри 3D-принтера та 3D-друку (налаштування столу, екструдера тощо і т.п) – S4.

Для визначення наступних ЛЗ, а саме R – здатності якісно зчитувати інформацію з тактильних моделей, застосовується аналогічний підхід, як і для процедури функції Q , однак R формалізується через свої властивості, а саме:

$$R = E_r(r_1, r_2, r_3), \quad (4.1.10)$$

де r_1, r_2, r_3 – 1) розмір крапки Брайля (діаметр, висота, відстань між крапками тощо); лінгвістичні змінні, визначені в попередніх розділах (T2/T3/T1); 2) фізико-механічні властивості (T4); 3) постдрукарські процеси, зокрема оздоблення поверхні моделі (T5).

Остання група ЛЗ – D , що визначає зносостійкість тактильної моделі, яка є не менш важливим показником якості сформованого тексту Брайля на тривимірних моделях. Змінна описується так:

$$D = E_d(d_1, d_2, d_3), \quad (4.1.11)$$

d_1 – матеріал моделі (матеріал для 3D-друку), ЛЗ – T6/S5; d_2 – розмір клітинок і сітки Брайля – S6; d_3 – тип шрифту (Braille-3D; Braille Embossing Font; Braille Standard Font) – S2.

Базуючись на результатах структурування факторів (процесів) формування шрифту Брайля в процесах 3D-друку (AB) за функціональними групами та рівнями вагомості, можна сформулювати синтезовану модель логічних висновків, яка буде відтворювати:

- побудову багаторівневої ієрархії зв'язків між компонентами вихідної бази даних;
- визначення алгоритмів розрахунку значень функцій належності ЛЗ з урахуванням ЛТ.

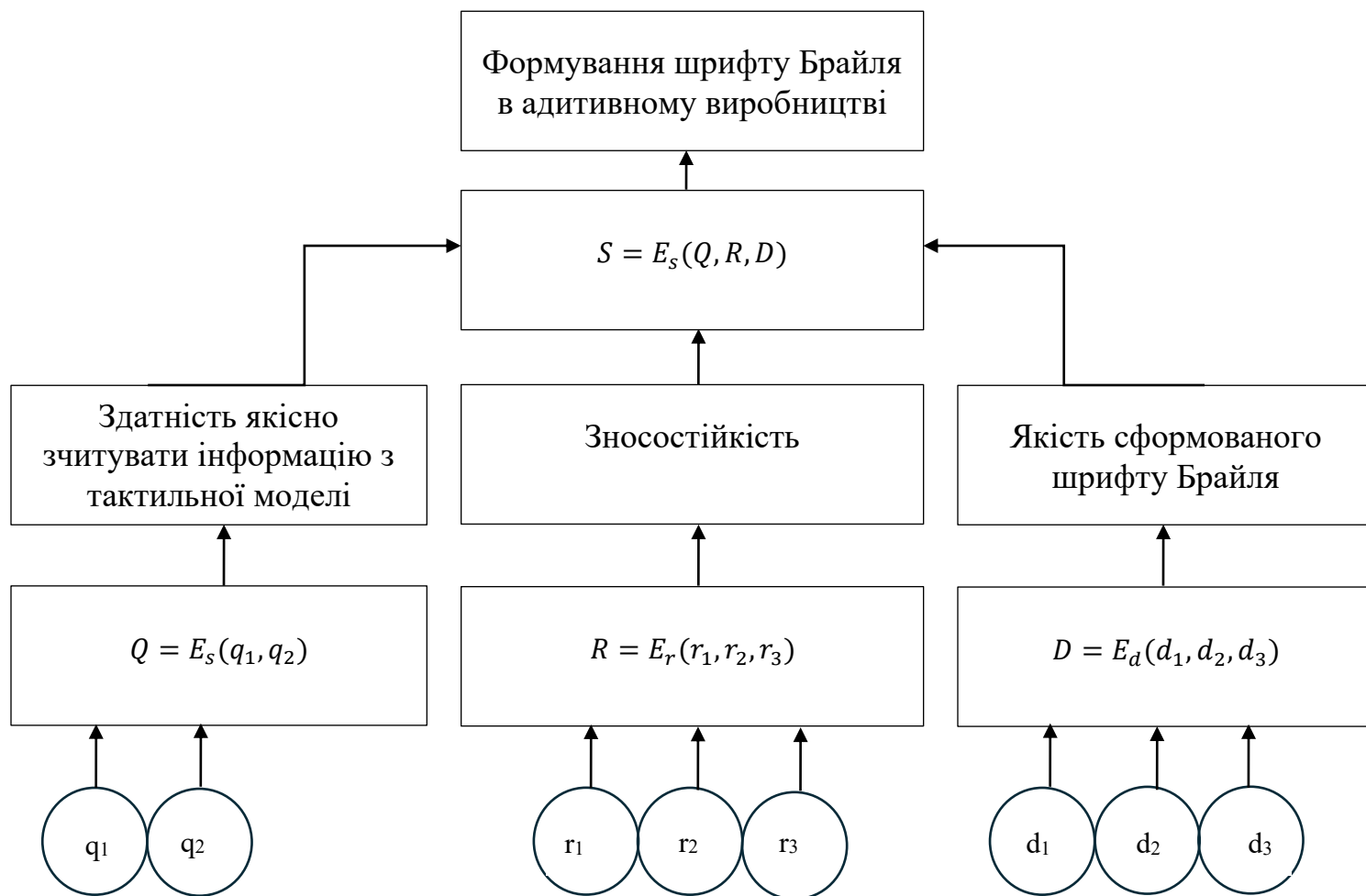


Рис. 4.1.1. Модель логічного виведення на основі показників якості формування шрифту Брайля в процесах АВ та 3D-моделювання

Синтезовано модель, у межах якої реалізуються процеси формування інтегральних показників якості формування шрифту Брайля за принципом «знизу – вверх».

4.2. Функції термів і їхні значення в процесі формування тактильних моделей в адитивному виробництві

Дослідження процесів формування брайлівських моделей, а також синтезована модель, побудована на основі структурування вихідної бази даних, створюють передумови для подальших етапів дослідження – зокрема необхідності сформувати універсальну базу даних на основі значень терм-множин та функцій ЛЗ. На етапах створення брайлівських тривимірних моделей у процесах адитивного виробництва та 3D-моделювання терми функцій належності і їхній набір лінгвістичних значень є частиною нечіткої логіки, що використовується для опису контролю факторів або процесів, а також оцінки кінцевої якості моделі. Це дає змогу відображати якісні (чітко визначені числові) та неякісні (задані умовно, без конкретних чисел) значення, або взагалі їх відсутність – у межах впливу на певні сторони лінгвістичних змінних. ЛЗ термів дають змогу описувати вихідні дані в описовій формі, вказуючи на рівень вагомості ЛЗ, що відповідає точкам поділу універсальної множини A .

Для більш якісної реалізації вихідних даних опишемо вхідні дані за допомогою таблиці 4.2.1–4.2.4 (див. додаток В) для кожного типу 3D-друку. Це необхідно для визначення оптимального типу 3D-друку, який найкраще підходить для створення тактильних моделей. У таблицях буде подано математичні значення ЛЗ з їх властивостями, які характеризують суть кожної множини універсального значення, а також множини універсальних термів із групуванням за шкалою до трьох значень. У дослідженні зосередимося тільки на трьох типах 3D-друку: FDM-FFF, SLA-DLP SLS і PolyJet, оскільки ці типи друку є найбільш поширеними. Спочатку подамо таблиці з базовими параметрами для кожного виду 3D-друку, хоча в деяких випадках ці параметри можуть бути специфічними, залежно від вимог виробника або замовника до 3D-моделей шрифту Брайля. Зокрема враховуються такі параметри: r_1 – розмір крапок шрифту Брайля, r_3 –

постдрукарські процеси, d_2 – розмір клітинок і сітки тексту Брайля, d_3 – тип/стиль шрифту Брайля (див. додаток В).

Як зазначалось раніше, вирішальним етапом дослідження факторів впливу на формування шрифту Брайля на різних етапах виробництва, а також на якість відтворення брайлівських 3D-моделей, є побудова функції належності, сформованих на основі терм-множин із лінгвістичними змінними. Цей етап є ключовим, оскільки враховує альтернативні декомпозовані фактори, що впливають на процес формування шрифту Брайля. Для оцінювання рівня якості формування шрифту Брайля на різних виробничих етапах використовується змінна S , а для реалізації системного підходу до лінгвістичних змінних запишемо їх у дискретних пунктах поділу a_i стандартної множини A . Для кожної такої точки буде визначено ранг $R_v(a_i)$, що відповідає за терми лінгвістичної змінної. Для обчислень введемо універсальну терм-множину $A = (a_1, a_2 \dots a_n)$ і ранги $R_v(a_i)$ – у квантовому поділу a_i ($i=1, \dots, n$). Таким чином, отримаємо вихідну умову для лінгвістичного терму «формування шрифту Брайля в технології 3D-моделювання» на основі нечіткої множини S ;

$$S_E = \left\{ \frac{\beta_s(a_1)}{a_1}, \frac{\beta_s(a_2)}{a_2}, \dots, \frac{\beta_s(a_n)}{a_n} \right\}, \quad (4.2.1)$$

де $S_E \subset A$; $\beta_v(a_i)$ – функція належності елемента $a_i \in A$ до множини S_E . $\beta_s(a_1)$ – нормоване значення функції належності, визначене за відповідним нормувальним коефіцієнтом. Зазначені функції належності будуть застосовані до процесів формування шрифту Брайля. На їх основі будуть сформовані нечіткі логічні рівняння, на основі яких буде побудовано відповідну матрицю. Функція лінгвістичних змінних буде поєднана з функцією рангів термів лінгвістичних змінних:

$$\frac{\beta_1}{R_1} = \frac{\beta_2}{R_2} = \frac{\beta_n}{R_n}, \quad (4.2.2)$$

$\beta_i = \beta_v(a_i); R_i = R_v(a_i)$ – для всіх $i = 1, \dots, n$. При цьому ФН повинна відповідати таким правилам: $\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_n = 1$.

Для отримання числових значень функцій належності недостатньо лише спиратися на експертні оцінки. Щоб отримати якісні значення з установленими рангами, необхідно побудувати ієрархію процесів та факторів, на основі якої можна буде розрахувати функції належності за такою формулою:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_3}{R_1} \dots \frac{R_n}{R_1}\right) R^{-1} \\ \beta_2 &= \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 + \frac{R_3}{R_1} \dots \frac{R_n}{R_1}\right) R^{-1}, \\ \beta_2 &= \left(\frac{R_1}{R_n} + \frac{R_2}{R_n} \dots \frac{R_3}{R_n} + 1\right) R^{-1} \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

Для реалізації цих дій необхідно виконати певні умови, зокрема здійснити поділ лінгвістичних змін, поданих у таблиці 4.3.1, на 6 пунктів, у межах яких проводитимуться розрахунки значень функцій належності. Для цього буде сформульовано завдання математичного прогнозування для оцінювання пріоритетних процесів і факторів, що впливають на якість формування шрифту Брайля. У випадку позитивних значень лінгвістичних термів, які є компонентами універсальної множини S , та максимальних значень ФН для кожного з термів у межах інтервалів терм-множин, необхідно забезпечити оптимальні значення, що визначатимуть пріоритетні фактори та рівень якості формування шрифту Брайля.

$$\begin{aligned} S_E = E(q_j, r_k, d_l) &\rightarrow \max, j = \overline{1,2}; k = \overline{1,3}; q_j > 0, r_k > 0, d_l > 0, l = \overline{1,4} \beta_Q(a_i) \\ &\rightarrow \max, a_i \in A, Q_E \subset A, i = \overline{1,6} \end{aligned}$$

Завдання 4.3.4 передбачає врахування таких властивостей, як універсальна терм-множина значень q_j, r_k, d_l , які є лінгвістичними змінними, віднесеними, до певних критеріїв. Основною умовою є використання як оптимальних, так і максимальних значень ФН для отримання інтегральних показників пріоритетних процесів і якості формування шрифту Брайля. При цьому для кожної лінгвістичної змінної здійснюється побудова квадратної симетричної матриці розміром 6х6 елементів. У межах кожної лінгвістичної змінної розглядаються такі лінгвістичні терми: «великий», «оптимальний», «низький»; «довготривалий», «оптимальне», «короткотривале»; високий, «середній», «низький».

$$M = \begin{bmatrix} 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3}{R_1} + \frac{R_4}{R_1} + \frac{R_5}{R_1} + \frac{R_6}{R_1} \\ \frac{R_1}{R_2} + 1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_5}{R_2} + \frac{R_6}{R_2} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \frac{R_1}{R_3} + \frac{R_2}{R_3} + 1 + \frac{R_4}{R_3} + \frac{R_5}{R_3} + \frac{R_6}{R_3} \end{bmatrix}, \quad (4.2.4)$$

Подальшим кроком є обчислення функцій належності лінгвістичних змінних для лінгвістичних термів множин Z та 0.10 пунктів поділу $a_{0.1}, a_{0.2}, a_{0.3}, a_{0.4}, a_{0.5}, a_1$ – універсальної бази значень терм-множини A . Наведена матриця слугує допоміжним компонентом для розрахунку функцій належності.

Усі розрахунки за відповідними параметрами наведено у додатку В (1–7). Етапи проведення розрахунків продемонструємо нижче на прикладі.

4.2.1 Параметри слайсера(q_1):

Параметри слайсера є основним фактором який має підфактори, що описуються терм-множинами лінгвістичної змінної, де контрольні точки базового інтервалу значень становлять від 0 до 5 умовних одиниць, тобто $A(q_1) = [1, 2, 3, 4,$

5]. Цей інтервал використовується для ідентифікації заданих ЛЗ для кожного типу 3D-друку відповідно до параметрів та підфакторів, а саме:

для SLA-DLP: $Z(q_{1.1}) = \langle \text{ультратонкий, тонкий, товстий} \rangle$; $Z(q_{1.2}) = \langle \text{короткий, середній, довгий} \rangle$; $Z(q_{1.3}) = \langle \text{короткий, середній, довгий} \rangle$; $Z(q_{1.4}) = \langle \text{горизонтальний, оптимальний, вертикальний} \rangle$.

Для SLS: $Z(q_{1.1}) = \langle \text{ультратонкий, тонкий, товстий} \rangle$; $Z(q_{1.2}) = \langle \text{короткий, середній, довгий} \rangle$; $Z(q_{1.3}) = \langle \text{короткий, середній, довгий} \rangle$; $Z(q_{1.2}) = \langle \text{горизонтальний, оптимальний, вертикальний} \rangle$.

Для FDM-FFF: $Z(q_{1.1}) = \langle \text{ультратонкий, тонкий, товстий} \rangle$; $Z(q_{1.2}) = \langle \text{короткий, середній, довгий} \rangle$; $Z(q_{1.3}) = \langle \text{короткий, середній, довгий} \rangle$; $Z(q_{1.2}) = \langle \text{горизонтальний, оптимальний, вертикальний} \rangle$.

Для PolyJet: $Z(q_{1.1}) = \langle \text{ультратонкий, тонкий, товстий} \rangle$; $Z(q_{1.2}) = \langle \text{короткий, середній, довгий} \rangle$; $Z(q_{1.3}) = \langle \text{короткий, середній, довгий} \rangle$; $Z(q_{1.2}) = \langle \text{горизонтальний, оптимальний, вертикальний} \rangle$.

Зауважимо, що параметр залежить від основного критерію – виду 3D-друку, у результаті чого терм-множина формується відповідно до цієї умови:

$$\begin{aligned} A(q_1) &= IF(FDM - FFF) = Parametr(S)_{FDM-FFF}; \\ IF(SLA - DLP) &= Parametr(S)_{SLA-DLP}; \\ IF(SLS) &= Parametr(S)_{SLS}; \\ IF(PolyJet) &= Parametr(S)_{PolyJet} \end{aligned} \quad (4.2.1.1)$$

З одного боку, логічним виглядає рішення про поділ інтервалу на три точки інтервалу з виконанням розрахунків функцій належності (ФН). Проте таке рішення не є оптимальним, оскільки унеможливорює отримання єдиного результату прийнятного для інших ЛЗ. Натомість при поділі інтервалу на п'ять точок значення ФН плавно переходять з одного статусу в інший завдяки використанню Гаусового відображення, що є перевагою порівняно з трикутною функцією належності.

На основі формули (4.3.5) виконаємо симетричну обернену матрицю рангів ЛЗ для SLA-DLP – «Товщина шару», який відтворює значення «ультратонкий». У цій матриці згідно з теоретичним фундаментом встановимо за експертними рекомендаціями елементи п'ятого рядка, а решту значень отримаємо із відповідної залежності:

SLA-DLP

1. «Товщина шару [0.01–0.2 мм]»

$$a_1 = 0.01, a_2 = 0.06, a_3 = 0.11, a_4 = 0.16, a_5 = 0.2$$

$$r_{51} = 5, r_{52} = 4, r_{53} = 3, r_{54} = 2, r_{55} = 1$$

$$M_{q1.1(1)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 12222 \\ 12333 \\ 12344 \\ 12345 \end{pmatrix}$$

Функцію належності (ФН) для терму «ультратонкий» побудовано на основі матриці (4.2.1.2) та виразу (4.2.3), унаслідок чого отримано неперонормовані значення також для інших точок поділу загального інтервалу:

$$\beta_i = \frac{r_{5i}}{\sum_{j=1}^5 r_{5j}}, j = \sum_{j=1}^5 r_{5j} = 15$$

$$\beta_1 = \frac{5}{15} = 0.333, \beta_2 = \frac{4}{15} = 0.267, \beta_3 = \frac{3}{15} = 0.2, \beta_4 = \frac{2}{15} = 0.133, \beta_5 = \frac{1}{15} = 0.067.$$

Для терму «тонкий» виконаємо аналогічні розрахунки:

$$r_{51} = 5, r_{52} = 4, r_{53} = 3, r_{54} = 2, r_{55} = 1$$

$$M_{q1.1(2)} = \begin{pmatrix} 54321 \\ 44321 \\ 33321 \\ 22221 \\ 11111 \end{pmatrix}$$

$$\beta_1 = \frac{5}{15} = 0.333, \beta_2 = \frac{4}{15} = 0.267, \beta_3 = \frac{3}{15} = 0.2, \beta_4 = \frac{2}{15} = 0.133, \beta_5 = \frac{1}{15} = 0.067.$$

Для терму «товстий» виконаємо аналогічні розрахунки:

$$r_{51} = 5, r_{52} = 4, r_{53} = 3, r_{54} = 2, r_{55} = 1$$

$$M_{q1.1(3)} = \begin{pmatrix} 55432 \\ 55432 \\ 44432 \\ 33332 \\ 22222 \end{pmatrix}$$

$$\beta_1 = \frac{5}{19} = 0.263, \beta_2 = \frac{5}{19} = 0.263, \beta_3 = \frac{4}{19} = 0.211, \beta_4 = \frac{3}{19} = 0.158, \beta_5 = \frac{2}{19} = 0.105.$$

2. «Час експозиції [1–15 с]»

$$a1 = 0.1, a2 = 1.3, a3 = 2.5, a4 = 3.7, a5 = 5$$

Терм «короткий»:

$$M_{q1.2(1)} = \begin{pmatrix} 55432 \\ 54432 \\ 43332 \\ 32222 \\ 21111 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{короткий}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

Терм «середній»:

$$M_{q1.2(2)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 13333 \\ 13555 \\ 13533 \\ 13531 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{середній}} = \{0.077, 0.231, 0.385, 0.231, 0.077\}$$

Терм «довгий»:

$$M_{q1.2(3)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 12222 \\ 12333 \\ 12344 \\ 12345 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{довгий}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

3. «Інтервали між шарами [0.1–5 с]»

$$a1 = 0.1, a2 = 1.3, a3 = 2.5, a4 = 3.7, a5 = 5$$

Терм «короткий»:

$$M_{q1.3(1)} = \begin{pmatrix} 55432 \\ 54432 \\ 43332 \\ 32222 \\ 21111 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{короткий}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

Терм «середній»:

$$M_{q1.3(2)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 13333 \\ 13555 \\ 13533 \\ 13531 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{середній}} = \{0.077, 0.231, 0.385, 0.231, 0.077\}$$

Терм «довгий»:

$$M_{q1.3(3)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 12222 \\ 12333 \\ 12344 \\ 12345 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{довгий}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

4. «Швидкість підйому платформи»

$$a1 = 1, a2 = 7.25, a3 = 13.5, a4 = 16.75, a5 = 20$$

Терм «горизонтальный»:

$$M_{q1.4(1)} = \begin{pmatrix} 55432 \\ 54432 \\ 43332 \\ 32222 \\ 21111 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{горизонтальный}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

Терм «оптимальный»:

$$M_{q1.4(2)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 13333 \\ 13555 \\ 13533 \\ 13531 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{оптимальный}} = \{0.077, 0.231, 0.385, 0.231, 0.077\}$$

Терм «вертикальный»:

$$M_{q1.4(3)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 12222 \\ 12333 \\ 12344 \\ 12345 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{вертикальный}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

5. «Товщина дренажу смоли [0.1–1 мм] =>

$$a1 = 0.1, a2 = 0.325, a3 = 0.55, a4 = 0.775, a5 = 1$$

Терм «тонкий»:

$$M_{q1.4(1)} = \begin{pmatrix} 55432 \\ 54432 \\ 43332 \\ 32222 \\ 21111 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{тонкий}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

Терм «середній»:

$$M_{q1.4(2)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 13333 \\ 13555 \\ 13533 \\ 13531 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{середній}} = \{0.077, 0.231, 0.385, 0.231, 0.077\}$$

Терм «товстий»:

$$M_{q1.4(3)} = \begin{pmatrix} 11111 \\ 12222 \\ 12333 \\ 12344 \\ 12345 \end{pmatrix}$$

$$\beta_{\text{товстий}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

Згідно з теоретичними правилами проведемо нормування значень функцій належності за допомогою встановленого коефіцієнта:

$$K_{term} = \frac{1}{\max(\beta_{term}(a_i))}, \beta_{term(n)}(w_i) = K_{term} \times \beta_{term}(a_i), \quad (4.2.2.2)$$

де K_{term} – лінгвістичний терм (ультратонкий, тонкий, товстий, середній, довгий, короткий, горизонтальний, вертикальний, оптимальний тощо). У результаті нормування отримано такі значення (див. додаток В 2.1–2.7):

SLA-DLP, PolyJet. Оптимальні значення параметрів забезпечують високу якість друку текстів Брайля завдяки наступним параметрам:

середня товщина шару (0.05 мм) – оптимальне значення для чіткості та деталізації;

висока товщина наповнення (100%) – гарантує структурну цілісність;

температура камери (25°C) – покращує адгезію шарів;

швидкість друку (5 мм/хв) – оптимальне значення для поєднання швидкості і якості друку.

Технологія SLS:

- середня товщина шару (0,15 мм) – оптимальне значення для забезпечення чіткості та деталізації;
- товщина заповнення (від 50 %) – забезпечує структурну цілісність виробу;
- товщина для Брайля (1.5–2 мм) – специфічні параметри для друку текстів Брайля, що забезпечують хорошу читабельність.

Підсумовуючи результати дослідження (див. додаток В 2.1–2.7), отримано оптимальні параметри для формування шрифту Брайля на 3D-моделях. Згідно з аналізом оптимальними є такі характеристики: тип шрифту – Braille Standard Font та Braille-3D Font (для випуклих крапок). Традиційні шрифти Брайля не завжди враховують обмеження 3D-друку (наприклад мінімальну товщину шару). Шрифт raille-3D Font спроектовано з урахуванням цих нюансів. Також шрифт придатний для друку на різних матеріалах (пластик, метал тощо), що робить його універсальним. Розмір сітки – середній (2.3 мм x 2.3 мм). Розмір клітинок – середній (2.4 мм). Форма крапки у більшості випадків випукла (raised), забезпечує найкраще тактильне відчуття. Втоплені крапки легше відчувати пальцями, що робить їх оптимальними для створення моделей Брайля. З іншого боку, втоплені крапки можуть застосовуватися у спеціалізованих випадках залежно від побажань замовника чи технічного завдання. На основі розрахунків функцій належності,

фізичних параметрів, властивостей матеріалів і параметрів друку для різних 3D-технологій (SLA-DLP, FDM/FFF, SLS, PolyJet) встановлено, що PolyJet, SLA-DLP – найкращі технології для створення тактильних моделей із текстом Брайля, оскільки забезпечують високу точність 3D-друку (до 0.016 мм), можливість досягнення високої деталізації крапок Брайля, широкий вибір матеріалів (жорсткі, еластичні, прозорі), точне керування параметрами (UV-затвердіння, подача матеріалу). SLA/DLP дозволяє відтворювати моделі з високою точністю шару від 0,01 до 0,05 мм, що є оптимальним для створення крапок Брайля різної висоти та діаметра. Також має хорошу гладкість поверхні, що мінімізує необхідність шліфування – важлива властивість для тактильного зчитування інформації. SLS характеризується високою міцністю і довговічністю матеріалів, особливо нейлонів (PA12, PA11), а також високою стійкістю до крапок до тиску. FDM/FFF – оптимальний для бюджетних прототипів. Недоліком є обмежена точність (близько 0.2 мм), що ускладнює цю технологію для створення деталізованих брайлівських моделей.

Оптимальні параметри друку моделей Брайля для «Параметри слайсера»:

Товщина шару:

- SLA/DLP: 0.01–0.05 мм
- PolyJet: 0.016–0.03 мм
- SLS: 0.1–0.2 мм
- FDM: 0.1–0.15 мм
- Інтервали між шарами: 0.1–0.5 с
- Швидкість підйому платформи (SLA/DLP): 5–10 мм/с

Розміри крапок Брайля:

- Висота крапки: 0.2-0.5 мм
- Діаметр крапки: 1.2–1.5 мм
- Відстань між крапками: 2.0 мм
- Тип крапки та шрифту: raised, 3D-Font

Модуль пружності:

- PolyJet: 2000–3000 МПа
- SLA/DLP: 1000–4000 МПа
- SLS: 800–2500 МПа
- Коефіцієнт тертя: 0.2–0.4 – сприяє підвищенню тактильного сприйняття

Матеріали:

- PolyJet: еластичні та стандартні смоли для тактильного сприйняття
- SLA/DLP: міцні та біосумісні смоли
- SLS: нейлон PA12 для довговічності та міцності
- FDM: TPU – для гнучких моделей, PLA – для бюджетних прототипів.

Постдрукарські процеси:

- Зняття підтримки: оптимально для SLA та PolyJet – 5–7 хв.
- Очищення моделей: 5–10 хв, особливо для SLS та SLA.
- Шліфування: повне покриття (70–100%) для всіх технологій з метою досягнення гладкості.

На основі отриманих даних сформовано таку ієрархію типів 3D-друку, які є оптимальними для створення 3D-моделей Брайля.

1. PolyJet – найкраща технологія для створення якісних моделей із текстом Брайля завдяки високій точності, різноманітності матеріалів і можливості контролю параметрів.

2. SLA-DLP забезпечують високу точність і гладкість поверхні, що робить їх придатними для складних прототипів.

2. SLS краще підходить для завдань, де важлива міцність і довговічність, особливо при використанні нейлону.

4. FDM/FFF доцільно розглядати для бюджетних рішень і простих прототипів.

4.3. Розрахунок вагових значень факторів впливу з нечіткою базою знань та нечітких логічних рівнянь

Формування шрифту Брайля за допомогою технологій 3D-моделювання включає низку процесів – від використання інформаційних систем до процесів адитивного виробництва. Є велика кількість факторів, що впливають на якість тактильних 3D-моделей. Для розподілу цих факторів за критеріями було проведено дослідження та побудовано модель логічного виведення (рис 4.1), яка дозволяє виокремити три основні критерії впливу, що, своєю чергою, дає змогу класифікувати фактори та покращити якісні показники тривимірних моделей зі шрифтом Брайля. У підрозділі 4.3 виконано сортування факторів, що впливають на якість формування шрифту Брайля. При цьому було виключено певні фактори, зокрема інформаційні системи (програмне забезпечення для 3D-моделювання), оскільки наявне розмаїття програм не дозволяє однозначно визначити їхню ефективність для різних виробників. Те, що є оптимальним для одного користувача, може бути неприйнятним для іншого. Тому подальше дослідження зосереджено на безпосередніх факторах, які впливають на якість друку. Водночас для повноти та підтвердження дослідження важливо врахувати експертно обґрунтовані логічні комбінації нечітких лінгвістичних термів як основу формування нечіткої бази знань і побудови системи нечітких логічних рівнянь. Розв’язання таких рівнянь дозволяє отримати прогностичне числове оцінювання якості формування шрифту Брайля в технологіях 3D-моделювання.

За фундаментальну основу взято модель логічного виведення, яка виконує ієрархічну ідентифікацію критеріїв факторів впливу на формування шрифту Брайля. Якість тактильної 3D-моделі визначатиметься показником S , який на фінальному етапі формуватиме інтегральний показник факторів впливу на якість. Для нього показника сформовано множину лінгвістичних термів: $H(S) = \langle MAX, AVG, MIN \rangle$. Згідно з моделлю отримуємо такі множини:

$H(Q) = \langle MAX, AVG, MIN \rangle$ – здатність якісно зчитувати інформацію з тактильної моделі;

$H(R) = \langle MAX, AVG, MIN \rangle$ – зносостійкість;

$H(D) = \langle MAX, AVG, MIN \rangle$ – якість сформованого шрифту.

Для визначених нечітких множин нечітка база знань факторів процесу формування шрифту Брайля використовує типову умовну конструкцію: «IF CONDITION THEN RESULT».

Зауважимо, що лінгвістичні терми підфакторів подаються у складі відповідної терм-множини кожного основного фактора:

$$Q = \sum q1.x + q1.x. + q2.x = Q(\text{лінгвістичний терм})$$

$$R = \sum r1.x + q1.x. + r2.x = R(\text{лінгвістичний терм}), \quad (4.3.1)$$

$$D = \sum d1.x + d1.x \dots + d3 = D(\text{лінгвістичний терм}).$$

Матриця знань, сформована на основі нечіткої бази знань, має такий вигляд (таблиця 4.3.1):

Таблиця 4.3.1

Матриця знань лінгвістичної змінної S

Здатність якісно зчитувати інформацію з тактильної моделі (Q)	Зносостійкість(R)	Якість сформованого шрифту Брайля (D)	Якість тактильної 3D-моделі (S)
висока	висока	висока	низька
низька	низька	низька	
середня	низька	середня	середня
середня	середня	середня	
середня	середня	висока	висока
середня	висока	висока	

Базуючись на запроєктованій матриці знань, сформуємо нечіткі логічні рівняння, які дозволять обчислити значення функцій належності для множин термів, що визначають кінцеву якість брайлівської 3D-моделі.

(4.3.2)

Для терму «низький»:

$$\beta_{\text{низький}}(S) = \beta_{\text{низькі}}(Q) \wedge \beta_{\text{низькі}}(R) \wedge \beta_{\text{низькі}}(D) \vee \beta_{\text{низькі}}(Q) \wedge \beta_{\text{низькі}}(R) \wedge \beta_{\text{низькі}}(D)$$

Для терму «середній»:

$$\beta_{\text{середній}}(S) = \beta_{\text{середні}}(Q) \wedge \beta_{\text{середні}}(R) \wedge \beta_{\text{середні}}(D) \vee \beta_{\text{середні}}(Q) \wedge \beta_{\text{середні}}(R) \wedge \beta_{\text{середні}}(D)$$

Для терму «високий»:

$$\beta_{\text{високий}}(S) = \beta_{\text{середні}}(Q) \wedge \beta_{\text{середні}}(R) \wedge \beta_{\text{середні}}(D) \vee \beta_{\text{середні}}(Q) \wedge \beta_{\text{високі}}(R) \wedge \beta_{\text{високі}}(D)$$

На основі ієрархічної побудови рівні моделей логічного виведення є аргументами функцій високого рівня: $Q = E_s(q_1, q_2)$; $R = E_r(r_1, r_2, r_3)$; $D = E_d(d_1, d_2, d_3, d_4)$, далі сформуємо варіанти логічних результатів, матриці знань та нечіткі логічні рівняння.

Для лінгвістичної змінної «Здатність якісно зчитувати інформацію з тактильної моделі (Q)»:

ЯКЩО $(q_1) = (\text{низькі, середні, високі})$, І $(q_2) = (\text{низькі, середні, високі})$, ТОДІ $(Q) = (\text{низький, середній, високий})$

Відповідно до логічних висловлювань отримуємо матрицю знань (таблиця 4.3.2):

Таблиця 4.3.2

Матриця знань лінгвістичної змінної Q

Параметри 3D-принтера (q1)	Параметри слайсера (q2)	Якість тактильної 3D-моделі (S)
низькі	низькі	низька
високі	високі	
високі	середні	середня
низькі	середні	
середні	середні	висока
середні	високі	

За таблицю 4.3.2 отримуємо нечіткі логічні рівняння для обчислення функцій належності, які відповідають здатності якісно зчитувати інформацію з тактильної моделі (Q):

(4.3.3)

Для терму «низький»:

$$\beta_{\text{низький}}(Q) = \beta_{\text{низькі}}(q1) \wedge \beta_{\text{низькі}}(q2) \vee \beta_{\text{високі}}(q1) \wedge \beta_{\text{високі}}(q2)$$

Для терму «середній»:

$$\beta_{\text{середній}}(Q) = \beta_{\text{високі}}(q1) \wedge \beta_{\text{середні}}(q2) \vee \beta_{\text{низькі}}(q1) \wedge \beta_{\text{середні}}(q2)$$

Для терму «високий»:

$$\beta_{\text{високий}}(Q) = \beta_{\text{середні}}(q1) \wedge \beta_{\text{середні}}(q2) \vee \beta_{\text{середні}}(q1) \wedge \beta_{\text{високі}}(q2)$$

Для лінгвістичної змінної «Зносостійкість(R)»:

ЯКЩО (r₁) = (низькі, середні, високі) І (r₂) = (низькі, середні, високі), І (r₃) = (низькі, середні, високі), ТОДІ (R) = (низький, середній, високий)

Відповідно до логічних висловлювань отримаємо матрицю знань:

Таблиця 4.3.3

Матриця знань лінгвістичної змінної R

Розміри крапок тексту шрифтом Брайля (r1)	Фізико-механічні властивості (r2)	Постдрукарські процеси (r3)	Якість тактильної 3D-моделі (S)
низькі	низькі	низькі	низька
високі	низькі	високі	
високі	середні	високі	середня
середні	низькі	низькі	
середні	високі	середні	висока
середні	середні	середні	

За таблицю 4.3.3 отримуємо нечіткі логічні рівняння для обчислення функцій належності, що характеризують зносостійкість (R):

Для терму «низький»:

(4.3.4)

$$\beta_{\text{низький}}(R) = \beta_{\text{низькі}}(r1) \wedge \beta_{\text{низькі}}(r2) \wedge \beta_{\text{низькі}}(r3) \vee \beta_{\text{високі}}(r1) \wedge \beta_{\text{високі}}(r2) \wedge \beta_{\text{високі}}(r3)$$

Для терму «середній»:

$$\beta_{\text{середній}}(R) = \beta_{\text{високі}}(r1) \wedge \beta_{\text{середні}}(r2) \wedge \beta_{\text{високі}}(r3) \vee \beta_{\text{середні}}(r1) \wedge \beta_{\text{низькі}}(r2) \wedge \beta_{\text{низькі}}(r3)$$

Для терму «високий»:

$$\beta_{\text{високий}}(R) = \beta_{\text{середні}}(r1) \wedge \beta_{\text{високі}}(r2) \wedge \beta_{\text{середні}}(r3) \vee \beta_{\text{середні}}(r1) \wedge \beta_{\text{середні}}(r2) \wedge \beta_{\text{середні}}(r3)$$

Для лінгвістичної змінної «Якість сформованого шрифту Брайля (D)»

ЯКЩО $(d_1) = (\text{низькі, середні, високі})$, І $(d_2) = (\text{низькі, середні, високі})$, ТОДІ $(D) = (\text{низький, середній, високий})$.

Відповідно до логічних висловлювань отримаємо матрицю знань:

Таблиця 4.3.4

Матриця знань лінгвістичної змінної D

Матеріал 3D-моделі (d1)	Розмір клітинок та сітки шрифту Брайля (d2)	Тип шрифту (d3)	Якість тактильної 3D-моделі (S)
низький	низькі	Braille Standard Font	низька
середній	низькі	Braille Embossing Font	
середні	високі	Braille-3D Font	середня
середні	середні	Braille Embossing Font	
високі	середні	Braille-3D Font	висока
високі	високі	Braille Standard Font	

За таблицею 4.3.4 отримуємо нечіткі логічні рівняння для обчислення функцій належності, що відповідають якості формування шрифту Брайля (D):

Для терму «низький»:

$$\beta_{\text{низька}}(D) = \beta_{\text{низькі}}(d1) \wedge \beta_{\text{низькі}}(d2) \wedge \beta_{\text{BrailleStandard}}(d3) \vee \beta_{\text{низькі}}(d1) \wedge \beta_{\text{низькі}}(d1) \wedge \beta_{\text{BrailleStandard}}(d3)$$

Для терму «середній»:

$$\beta_{\text{середня}}(R) = \beta_{\text{середні}}(d1) \wedge \beta_{\text{високі}}(d2) \wedge \beta_{\text{Braille-3D}}(d3) \vee \beta_{\text{середні}}(d1) \wedge \beta_{\text{середні}}(d2) \wedge \beta_{\text{BrailleEmbossing}}(d3)$$

Для терму «високий»:

$$\beta_{\text{середня}}(R) = \beta_{\text{високі}}(d1) \wedge \beta_{\text{середні}}(d2) \wedge \beta_{\text{Braille-3D}}(d3) \vee \beta_{\text{високі}}(d1) \wedge \beta_{\text{високі}}(d2) \wedge \beta_{\text{BrailleStandard}}(d3)$$

Рівняння на основі лінгвістичних нечітких даних стануть фундаментом для розрахунку числового значення прогнозованого рівня якості процесів формування шрифту Брайля (якості 3D-моделей із текстом Брайля) за допомогою технологій 3D-моделювання (адитивного виробництва). Отримані в результаті нечіткого математичного моделювання системи рівнянь стосуються виокремлених лінгвістичних змінних, об'єднаних в окремі функціональні групи другого рівня ієрархії. Згідно з моделлю логічного виведення подальшим кроком буде перехід до найвищого рівня, лінгвістична змінна якого визначатиме прогнозовану якість 3D-моделей Брайля.

4.4. Прогностичне оцінювання рівня якості моделей із рельєфно-крапковим шрифтом

Нечіткі лінгвістичні множини змінної S , яка ідентифікує фінальне значення якості сформованого шрифту Брайля для незрячих людей за допомогою 3D-моделювання в процесах адитивного виробництва з використанням різних технологій 3D-друку (FDM-FFF, SLA-DLP, SLS), визначаються функціями

належностями на основі трьох нечітких термів: «низька», «середня», «висока». Числові значення S формуються у трьох пунктах базової універсальної множини $A = \{a^{(1)}, a^{(2)}, \dots a^{(j)}\}$. Взявши за основу вираз (4.3.1), лінгвістичний терм «якість формування шрифту Брайля» можна записати в такому вигляді, де кількісні значення змінних встановлено в поділі універсальних множин:

$$S_E = \left\{ \frac{\beta_{\text{низький}}(a_1)}{a_1}, \frac{\beta_{\text{середній}}(a_2)}{a_2}, \frac{\beta_{\text{високий}}(a_n)}{a_3} \right\}, \quad (4.4.1)$$

a_1, a_2, a_3 – контрольні пункти інтервалів значень підсумкової величини якості формування шрифту Брайля в технологіях 3D-моделювання стосовно встановлених термів.

Логічне продовження дослідження базуватиметься на етапах, реалізованих вище для лінгвістичних груп другого рівня ієрархії, де встановлюється нечіткий логічний результат. Наступним кроком є формування матриці знань та нечітких логічних рівнянь на основі яких задаються функції належності та нормалізуються числові значення. У даному випадку почнемо з останнього етапу, де були отримані нечіткі множини функцій належності лінгвістичних змінних у квантах поділу універсальної бази знань, і запишемо їх у вигляді таблиць.

Таблиця 4.4.1

Функція належності терм-множини $Z(Q)$ FDM-FFF

Параметр	1 (Низький/ Ультратонкий)	3 (Середній/ Тонкий)	5 (Високий/ Товстий)
q_{1.1}	0.067	0.3	0.3
q_{1.2}	0.067	0.333	0.357
q_{1.3}	0.067	0.333	0.357
q_{1.4}	0.067	0.333	0.357
q_{2.1}	0.067	0.267	0.200
q_{2.2}	0.067	0.267	0.200
q_{2.3}	0.067	0.071	0.214

Для запису значень функцій належності кожен підпараметр буде визначатись, у якому діапазоні a_k, a_{k+1} перебувають його значення. Для обчислення значень β застосуємо лінійну інтерполяцію. Цей метод використовується для всіх трьох рівнів лінгвістичних термів (низька, середня, висока) для кожного підпараметра.

$$\beta(a_i) = \beta(a_k) + \frac{(a_i - a_k)}{(a_{k+1} - a_k)} \cdot (\beta(a_{k+1}) - \beta(a_k)), \quad (4.4.2)$$

Для $q_{1.1}$ та інших параметрів визначено контрольні інтервали $a_1 \dots a_5$, при цьому розглядаються тільки три ключові точки інтервалу:

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.325, 0.0111, 0.00004, 0.000000015\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0111, 0.325, 1.0, 0.325, 0.0111\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000000015, 0.00004, 0.0111, 0.325, 1.0\}$$

$$\beta_{\text{низька}}(a_i) = \beta(a_k) + \frac{(a_i - a_k)}{(a_{k+1} - a_k)} \cdot (\beta(a_{k+1}) - \beta(a_k))$$

Далі необхідно виконати формування функції належності, використовуючи такі правила:

$$\beta_{\text{низькі}}(q_{1.1} - q_{1.2}) = \min(0.067, 0.067, 0.067, 0.067) = 0.067$$

$$\beta_{\text{середні}}(q_{1.1} - q_{1.2}) = \min(0.333, 0.333, 0.333, 0.333) = 0.333$$

$$\beta_{\text{високі}}(q_{1.1} - q_{1.2}) = \min(0.357, 0.357, 0.357, 0.357) = 0.357$$

$$\beta_{\text{низькі}}(q_{2.1} - q_{2.3}) = \min(0.067, 0.067, 0.067) = 0.067$$

$$\beta_{\text{середні}}(q_{2.1} - q_{2.3}) = \min(0.267, 0.267, 0.071) = 0.267$$

$$\beta_{\text{високі}}(q_{2.1} - q_{2.3}) = \min(0.200, 0.200, 0.214) = 0.200$$

Таблиця 4.4.2

Функція належності терм-множини $Z(Q)$ SLA-DLP

параметр	1	3	5
q_{1.1}	0.8	0.7	0.4
q_{1.2}	0.8	0.7	0.4
q_{1.5}	0.6	0.8	0.4

Продовження таблиці 4.4.2			
q_{1.6}	0.6	0.8	0.4
q_{2.1}	0.8	0.7	0.4
q_{2.2}	0.6	0.8	0.4
q_{2.3}	0.6	0.6	0.8

Таблиця 4.4.3

Функція належності терм-множини Z(Q) SLS

a_i (Універсальне значення)	1 (Низький/ Ультратонкий)	3 (Середній/ Тонкий)	5 (Високий/ Товстий)
q_{1.1}	0.333	0.067	0.071
q_{1.2}	0.333	0.067	0.071
q_{2.1}	0.55	0.028	0.00000067
q_{2.2}	0.55	0.00034	0.0000000000001266

Таблиця 4.4.4

Функція належності терм-множини Z(Q) PolyJet

Параметр	1 (Низька/ Ультратонкий)	3 (Середня/ Тонкий)	5 (Висока/Товстий)
q_{1.1}	0.333	0.65	0.067
q_{1.2}	0.333	0.267	0.071
q_{1.3}	0.333	0.267	0.071
q_{1.4}	0.333	0.267	0.071
q_{2.1}	1.0	0.65	0.0003
q_{2.2}	1.0	0.411	0.0007
q_{2.3}	1.0	0.458	0.0044
q_{2.4}	1.0	0.65	0.01
q_{2.5}	1.0	0.682	0.0034
q_{2.6}	1.0	0.389	0.0034

Таблиця 4.4.5

Функція належності терм-множини Z(R) FDM-FFF/SLA-DLP/SLS/PolyJet

Параметр	1 (Низька/Вузьке)	3 (Середня)	5 (Висока/Довге)
r1.1	0.32	0.44	0.11
r1.2	0.3	0.46	0.12
r1.3	0.28	0.42	0.15
r1.4	0.35	0.4	0.15
r1.5	0.33	0.43	0.14
r1.6	0.31	0.41	0.16
r1.7	0.3	0.42	0.14
r1.8	0.32	0.44	0.13
r1.9	0.34	0.43	0.12
r1.10	0.33	0.45	0.14
r1.11	0.32	0.44	0.13
r2.1(FDM-FFF)	0.3	0.44	0.1
r2.2(FDM-FFF)	0.31	0.44	0.14
r2.3(FDM-FFF)	0.33	0.44	0.1
r2.1(SLA-DLP)	0.32	0.47	0.14
r2.2(SLA-DLP)	0.34	0.44	0.14
r2.3(SLA-DLP)	0.31	0.47	0.14
r2.1(SLS)	0.3	0.42	0.12
r2.2(SLS)	0.28	0.43	0.14
r2.3(SLS)	0.29	0.42	0.12
r2.1(PolyJet)	0.33	0.48	0.14
r2.2(PolyJet)	0.34	0.44	0.14
r2.3(PolyJet)	0.32	0.48	0.14
r3.1	0.32	0.44	0.11
r3.2	0.3	0.46	0.12
r3.3	0.28	0.42	0.15
r3.4	0.35	0.4	0.15

Таблиця 4.4.6

Функція належності терм-множин SLA-DLP, FDM-FFF, SLS, PolyJet, розміри крапок і тип шрифту Брайля Z(D)

параметр	1(a1)	3(a3)	5(a5)
d_{2.1}	0.0003	0.011	0.00004
d_{2.2}	0.000000015	0.00035	0.000004
d_{3.1}	-	-	-
SLA-DLP			
d_{1.1}	0.607	0.85	0.050
d_{1.2}	0.607	0.8	0.011
d_{1.3}	0.607	0.85	0.050
d_{1.4}	0.325	0.607	0.011
d_{1.5}	0.249	0.607	0.249
d_{1.6}	0.607	0.8	0.011
d_{1.7}	0.607	0.8	0.011
d_{1.8}	0.607	0.8	0.011
FDM-FFF			
d_{1.1}	0.5	0.5	0.0034
d_{1.2}	0.55	0.55	0.0111
d_{1.3}	0.55	0.55	0.01
d_{1.4}	0.55	0.55	0.0111
d_{1.5}	0.55	0.55	0.0111
SLS			
d_{1.1}	0.607	0.607	0.135
d_{1.2}	0.458	0.458	0.044
d_{1.3}	0.607	0.55	0.1
d_{1.4}	0.607	0.607	0.135
d_{1.5}	0.607	0.55	0.1
PolyJet			
d_{1.1}	0.607	0.8	0.135
d_{1.2}	0.458	0.8	0.044

Продовження таблиці 4.4.6			
d_{1.3}	0.607	0.85	0.135
d_{1.4}	0.325	0.607	0.325
d_{1.5}	0.249	0.249	0.249
d_{1.6}	0.607	0.8	0.135
d_{1.7}	0.607	0.85	0.135
d_{1.8}	0.607	0.9	0.135

Для виконання прогностичного оцінювання рівня формування шрифту Брайля (якість брайлівських 3D-моделей) з урахуванням різних технологій 3D-друку, які супроводжуються розрахунком фактичних значень функцій належності лінгвістичної змінної S , необхідно задати вихідні значення функцій належності лінгвістичних змінних, які були використані в дослідженні, з урахуванням універсальної бази значень A . Для цього будемо використовувати таблиці 4.4.1–4.4.6, які фіксують зв'язок між точками поділу терм-множин та відповідними їм значеннями функцій належності. Для отримання кінцевих інтегральних показників виконаємо об'єднання параметрів (Q, R, D) з урахуванням загальних параметрів та термів (низький, середній, високий) для кожної технології 3D-друку за умовою: IF FDM-FFF=.... IF SLA-DLP=... і так далі.

Використовуючи отримані інтегральні показники для кожного виду 3D-друку з множини Q, R, D, для зручності підсумуємо результати у вигляді таблиці:

Таблиця 4.4.7

Інтегральні показники

Технологія 3D-друку	Q	R	D
FDM-FFF	0.402	0.399	0.406
SLA-DLP	0.582	0.546	0.564
SLS	0.428	0.412	0.443
PolyJet	0.575	0.545	0.547

На основі значень інтегральних показників обчислимо середні значення за множинами для кожної технології 3D-друку за такою формулою:

$$S(Q, R, D) = \frac{\beta_Q + \beta_R + \beta_D}{3}, \quad (4.4.3)$$

Для FDM-FFF, SLA-DLP, SLS 3D-друку отримуємо значення:

$$S(FDM - FFF) = \frac{0.402 + 0.399 + 0.406}{3} = 0.402$$

$$S(SLA - DLP) = \frac{0.582 + 0.546 + 0.564}{3} = 0.564$$

$$S(SLS) = \frac{0.428 + 0.412 + 0.443}{3} = 0.428$$

$$S(PolyJet) = \frac{0.575 + 0.545 + 0.547}{3} = 0.556$$

Виконані кроки та процедури з використанням методів теорії нечітких множин включають наступні етапи: модель логічного висновку, що базується на групуванні лінгвістичних змінних за їх функціональними властивостями; універсальна множина термів, що складається з базових значень; нечітка база знань; нечіткі логічні формули; функції належності та визначені для них лінгвістичні терми, а також показники якості лінгвістичних змінних, які є фазифікацією. Наступним етапом дослідження є дефазифікація нечіткої множини на основі розрахованих значень функцій належності лінгвістичних змінних другого рівня ієрархії моделі логічного виведення. При цьому рівень якості прогнозування формування шрифту Брайля в різних технологіях 3D-друку розраховується за формулою, що базується на основі методу центру ваги плоскої фігури, обмеженої горизонтальною віссю та графіком функцій належності лінгвістичних змінних верхнього рівня:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \left[\underline{s} + (i-1) \frac{\bar{s}-\underline{s}}{m-1} \right] \beta_i(S)}{\sum_{i=1}^m \beta_i(S)}, \quad (4.4.4)$$

де $\bar{S}$ та $\underline{S}$ є максимальними та мінімальними значеннями якості формування шрифту Брайля; m – кількість якісних терм-змінних S . Для обчислення приймемо вхідні значення: $m = 3$, $\beta_1(S) = \beta_{\text{низька}}(S)$, $\beta_1(S) = \beta_{\text{висока}}(S)$, $\beta_1(S) = \beta_{\text{середня}}(S)$. Для S встановимо максимальні та нижні граничні значення $\bar{S} = 1\%$ та $\underline{S} = 100\%$. Розрахунки будуть виконанні у трьох основних проміжних інтервалах (1, 50, 100). Базуючись на даних, отриманих раніше, вище значення функцій належності лінгвістичної змінної S для термів («низька», «середня», «висока») дозволяють остаточно отримати фактичне показника якості формування шрифту Брайля для незрячих людей:

Таблиця 4.4.8

Фінальні результати та рейтинг технологій 3D-друку

Технологія 3D-друку	Результати дефазифікація
SLA-DLP	58.2%
PolyJet	57.4%
FDM-FFF	46.3%
SLS	43.1%

Як бачимо, технології 3D-друку SLA-DLP та PolyJet є лідерами і найкращим вибором для створення тривимірних брайлівських тактильних моделей, оскільки це зумовлено високою точністю та стабільністю процесів фотополімеризації, що робить їх кращими для завдань, що потребують деталізованих моделей. Слідом за ними йде технологія FDM-FFF, яка демонструє впевнені результати, але поступається SLA-DLP через обмеження у вирішенні та можливу неоднорідність при створенні складних геометрій. Останньою в рейтингу є технологія SLS, яка хоча й має свої переваги (висока міцність та можливість створення складних форм), її недоліки, такі як шорсткість поверхні та обмеження щодо деталізації, знижують інтегральну якість. Хоча дослідження проводилось саме щодо якості формування

шрифту Брайля з врахуванням різних факторів впливу, у майбутньому необхідно розширити дослідження, врахувавши такі фактори, як швидкість друку (тривалість друку) та зручність експлуатації обладнання.

4.5. 3D-друк та розробка експериментальних прототипів із шрифтом Брайля на різних матеріалах

Для підтвердження теоретичних досліджень та отриманих результатів було виконано експериментальне дослідження друкування тексту шрифтом Брайля на різних матеріалах за допомогою 3D-принтера. Дослідження проводилось на 3D-принтері FDM, друк PLA-пластиком. Висота крапки 0.3 мм (радіус 0.15 мм), тип шрифту – raised (ви pukлий). Основа для нанесення шрифту Брайля була представлена такими матеріалами:

- 1) Папір
- 2) Скло
- 3) Прозорий пластик
- 4) Ниткоподібний PLA-пластик
- 5) Плівка
- 6) ПВХ-матеріали (прозора плівка та паперовий ПВХ)



Рис. 4.5.1. Результат 3D-друку PLA-пластиком на офісному папері ~ 70 г/м²
(фактура текстурована)



Рис. 4.5.2. Результат 3D-друку PLA-пластиком на папері ~ 80 г/м²



Рис. 4.5.3. Результат 3D-друку PLA-пластиком на папері ~ 150 г/м² (фактура гладка)



Рис. 4.5.4. Результат 3D-друку PLA-пластиком на папері ~ 130 г/м² (фактура текстурована)

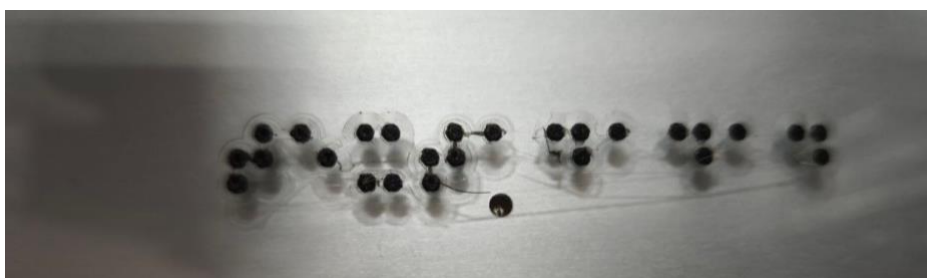


Рис. 4.5.5. Результат 3D-друку PLA-пластиком на скляному столі 3D-принтера



Рис. 4.5.6. Результат 3D-друку PLA-пластиком на прозорій гладкій пластмасовій основі



Рис. 4.5.7. Результат 3D-друку PLA-пластиком на скляній основі

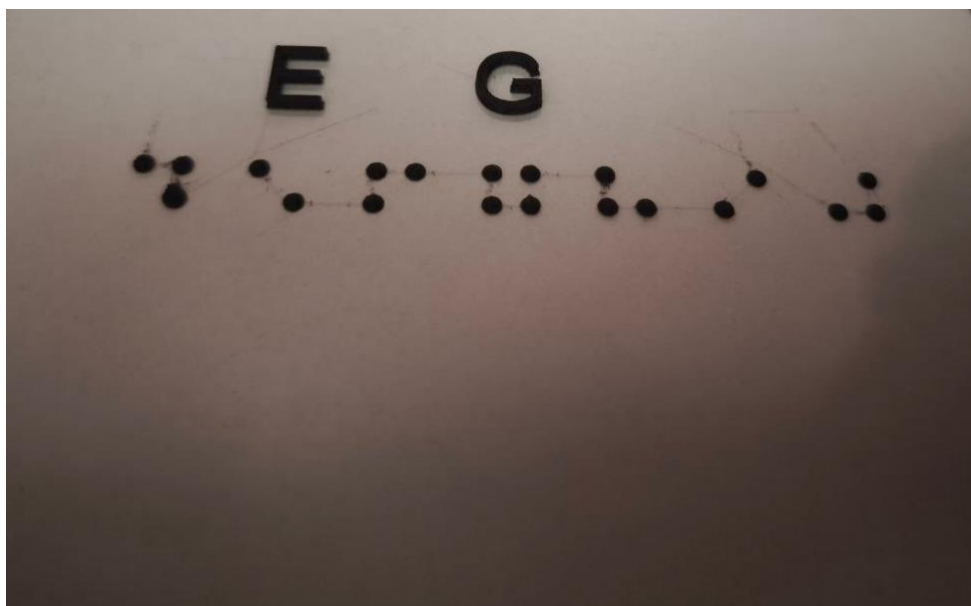


Рис. 4.5.8. Результат 3D-друку PLA-пластиком на тонкій плівці



Рис. 4.5.9. Результат 3D-друку PLA-пластиком на пластиковій глянцевої основі



Рис. 4.5.10. Результат 3D-друку PLA-пластиком на прозорому ПВХ-матеріалі

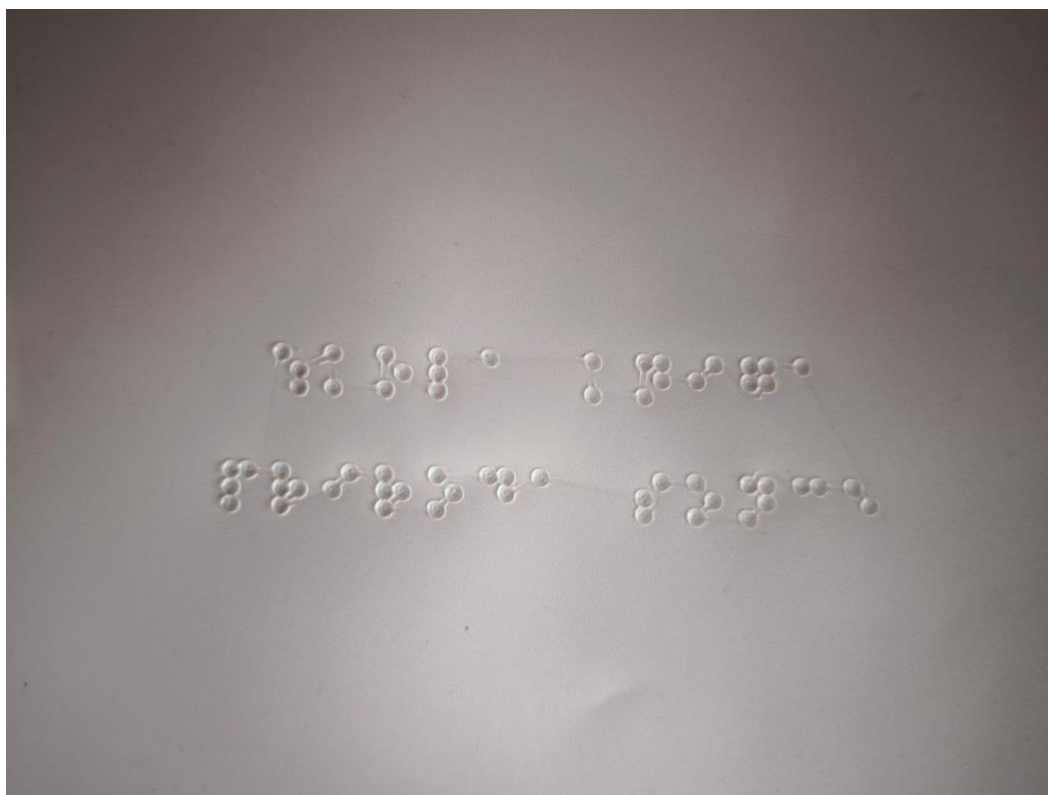


Рис. 4.5.11. Результат 3D-друку PLA-пластиком на паперовому ПВХ-матеріалі

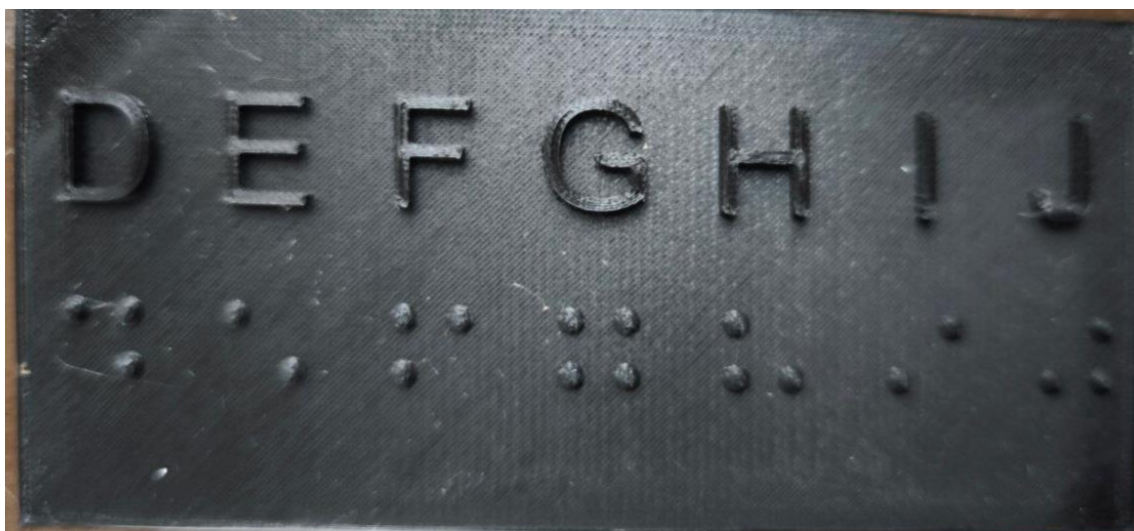


Рис. 4.5.12. Результат 3D-друку PLA-пластиком на PLA-основі

Під час проведення дослідження в навчально-реабілітаційному комунальному закладі «Левеня» для дітей із порушеннями зору проводилось оцінювання друкованих прототипів за стійкістю до тертя і якістю зчитування тактильної інформації. Було виявлено що найбільш стійким до тертя є матеріал на основі PLA-пластику, а також папір із високою щільністю понад 100 г/м². Натомість на офісному папері та папері з меншою щільністю текст шрифту Брайля міцно не тримався при тактильному зчитуванні. Текст шрифтом Брайля на склі при неактивному зчитуванні тримався міцніше. На різних тонких плівках шрифт Брайля при тактильному зчитуванні швидко стирався і був нестійким до тактильного зчитування. Також було встановлено, що чим менший розмір крапки на папері щільністю 70 г/м², тим він більш стійкий до тертя, хоча в порівнянні з моделями на основі PLA-пластику такий папір є менш стійким. Водночас на склі текст шрифтом Брайля нестійкий до активного тертя і не рекомендується для використання в інклюзивному середовищі для незрячих людей, оскільки може становити небезпеку при тактильному читанні (тріщина на склі тощо). Щодо друку на плівках та ПВХ-матеріалах (ПВХ-папір та плівка), PLA-покриття виявилось нестійким уже при першому тактильному читанні випуклі крапки руйнувались. У випадку

використання таких матеріалах рекомендуємо створювати заглиблені (recessed) крапки які є більш стійкими до тертя. Отже, на основі проведених досліджень не рекомендується використовувати офісні папери з щільністю менше 130 г/м², плівки та сторонні пластикові матеріали (що не передбаченні технологією 3D-друку, наприклад, пластикові підставки тощо. На основі отриманих результатів складено в таблицю 4.5.1.

Таблиця 4.5.1

**Результати дослідження стирання та збереження тактильного шрифту
Брайля**

№	Матеріал	Адгезія PLA	Стирання (1-5)	Читабельність після 10 циклів	Зауваження
1	Папір офісний ~70 г/м ²	Низька	1	1	Крапки стираються
2	Папір ~80 г/м ²	Низька	1	1	Крапки стираються
3	Папір ~150 г/м ² , фактура гладка	Середня	2	2	Тримаються краще, але стирається
4	Папір ~130 г/м ² (фактура текстурована)	Низька	1	1	Низький рівень тактильного сприйняття
5	На склі стола 3D- принтера	Середня	3	2	Міцно тримаються, небезпечно для тактильного читання
6	На прозорій гладкій пластмасовій основі	Дуже низька	1	1	Крапки не тримаються, слабка адгезія
7	На склі	Середня	1	1	Міцно тримаються, небезпечно для тактильного читання
8	На тонкій плівці	Низька	1	1	Низький рівень адгезії
9	На пластиковій глянцевій основі	Низька	1	1	Низький рівень адгезії, швидко стираються крапки
10	На прозорому ПВХ- матеріалі	Дуже низька	1	1	Низький рівень адгезії, швидко стираються крапки
11	На паперовому ПВХ- матеріалі	Дуже низька	1	1	Низький рівень адгезії, швидко стираються крапки

Продовження таблиці 4.5.1					
12	На основі PLA-пластику	Висока	5	5	Оптимально, але потрібна постдрукерська обробка

У випадку використання матеріалів, а саме паперу з щільністю менше ніж 130 г/м^2 , рекомендується розмір крапки 0.1 мм . Для матеріалу PLA-пластику рекомендоване значення розміру крапки – не більше $0.3/0.4 \text{ мм}$ (радіус $\sim 0.15 \text{ мм}$).

Нижче наведено розрахунки собівартості формування шрифту Брайля (алфавіт від А до Z) методом 3D-друку на FDM-принтері з використанням матеріалу PLA де основою є матеріали різного виду: папір, плівка, пластик. У розрахунках використані базові параметри, при цьому розміри та ціни можуть змінюватись залежно від конкретного проекту, постачальників та регіону. Для початку використаємо формулу 2.2.8 та 2.2.9.

$$C_{3D} = C_{mat} + C_{machine} + C_{post}, \quad (4.5.1)$$

$$C_{total} = C_{3D} + C_{substrate}$$

C_{mat} – вартість матеріалу (пластик, фотополімер тощо); $C_{machine}$ – вартість роботи обладнання (час друку, енерговитрати, амортизація); C_{post} – витрати на постдрукерську обробку (шліфування моделі, очищення тощо); $C_{substrate}$ – вартість підкладки (папір, плівка, пластик).

Вхідні дані:

1. Конструкція відбитка для кожної підкладки:

Кожен символ (літера) займає приблизно $3 \times 3 \text{ см}$;

Товщина базової пластини під букву – 2 мм ;

Рельєф (брайлівські «raised») має висоту приблизно 2 мм і утворює невеликий об'єм $\sim 0,6 \text{ см}^3$ на символ.

2. Обсяг матеріалу PLA:

Приблизний розрахунок обсягу однієї літери:

Базова частина: $3 \text{ см} \times 3 \text{ см} \times 0,2 \text{ см} \approx 1,8 \text{ см}^3$.

Рельєф (6 точок): $\sim 0,1 \text{ см}^3$ на кожну $\rightarrow 0,6 \text{ см}^3$.

Разом на букву: $\sim 2,4 \text{ см}^3$.

Для 26 літер отримуємо сумарний обсяг:

$$V_{1prototype} = 2.4 \text{ см}^3 \times 26 \approx 62.4 \text{ см}^3$$

3. Маса PLA.

При щільності PLA приблизно $1,25 \text{ г/см}^3$:

$$m = 62.4 \text{ см}^3 \times 1.25 \approx 78 \text{ г}$$

4. Вартість PLA.

Якщо вартість PLA становить близько \$20 за 1 кг (1000 г), то ціна за грам - \$0,02. Вартість PLA для одного набору:

$$78 \text{ г} \times 0.02 \$ \approx 1.56 \$$$

5. Основа матеріалу (підкладка)

Орієнтовні витрати на кожну підкладку (одноразово):

- Папір: 0,10\$.
- Плівка: 0,20\$.
- Пластик (наприклад, акрилова або полімерна пластина): 0,50\$.
- Скло (скляна пластина 15x15 см): 1,00\$.

6. Виготовлення прототипів.

Оскільки друкуємо по одному прототипу на кожну підкладку, для розрахунку сумарної витрати PLA множимо витрату на один набір на 4.

Розрахунок собівартості для кожного варіанта

1. Витрата PLA для одного набору (одна підкладка):

- 1,56\$ (на 78 г PLA).
- Для 4 наборів (на 4 підкладки): $1,56 \$ \times 4 = 6,24 \$$.

2. Витрати на підкладки:

- Папір: 0,10\$

- Плівка: 0,20\$
- Пластик: 0,50\$
- Скло: 1,00\$
- Разом: $0,10 + 0,20\$ + 0,50\$ + 1,00\$ = 1,80\$$.

3. Загальна собівартість:

- Матеріал PLA: 6,24\$
- Підкладки: 1,80\$
- Разом: $6,24\$ + 1,80\$ = 8,04\$$

4. Вартість роботи обладнання:

$t=12$ годин.

Вартість роботи 3D-принтера $\sim 5\$/год$.

$$C_{machine} = t \times 5\$ = 2 \times 5 = 10\$$$

5. Постобробка:

$$C_{post} = 1\$$$

Загальна вартість без матеріалу:

$$C_{3D} = C_{mat} + C_{machine} + C_{post} = 1.56 + 10 + 1 = 12.56\$$$

- На папері:

$$C_{total} = 12.56 + 0.10 = 12.66\$$$

- На плівці:

$$C_{total} = 12.56 + 0.20 = 12.76\$$$

- На пластику:

$$C_{total} = 12.56 + 0.50 = 13.06\$$$

- На склі:

$$C_{total} = 12.56 + 1.00 = 13.56\$$$

Традиційний метод виробництва (тиснення):

1. Фіксовані витрати на обладнання та штампи для тиснення:

$$F_{tool} = 2000\$$$

2. Тираж:

$Q = 1000$ – екземплярів при масовому виробництві.

3. Змінні витрати:

Папір $C_{mat} = 0.10\$$; робота та інше – $C_{lab} = 0.05\$$; всього – $C_{var} = 0.15\$$;

Плівка $C_{mat} = 0.20\$$; робота та інше – $C_{lab} = 0.10\$$; всього – $C_{var} = 0.30\$$;

Пластик $C_{mat} = 0.40\$$; робота та інше – $C_{lab} = 0.10\$$; всього – $C_{var} = 0.50\$$;

Скло $C_{mat} = 0.80\$$; робота та інше – $C_{lab} = 0.20\$$; всього – $C_{var} = 1.00\$$;

4. Амортизація фіксованих витрат:

$$\frac{F_{tool}}{Q} = \frac{2000}{1000} = 2\$$$

5. Кінцева вартість:

$$C_{trad(\text{папір})} = 2 + 0.15 = 2.15\$$$

$$C_{trad(\text{плівка})} = 2 + 0.30 = 2.30\$$$

$$C_{trad(\text{пластик})} = 2 + 0.50 = 2.50\$$$

$$C_{trad(\text{скло})} = 2 + 1.00 = 3.00\$$$

6. Додаткові витрати:

$$C_{trad} = \frac{F_{tool}}{Q} + C_{var} + C_x$$

На основі цих даних наведемо фінальні результати вартості 3D-друку та традиційного виробництва:

Традиційний метод:

- Папір: $\approx 2.15\$$ (без накладних витрат), з накладними – $2.18\$$
- Плівка: $\approx 2.30\$$
- Пластик: $\approx 2.50\$$
- Скло: $\approx 3.00\$$

3D-друк (адитивне виробництво):

- Папір: $\approx 12.66\$$
- Плівка: $\approx 12.76\$$

- Пластик: $\approx 13.06\$$
- Скло: $\approx 13.56\$$

Враховуючи задані припущення, для виготовлення одного повного набору шрифту Брайля (алфавіт A–Z) методом FDM-друку з PLA (з рельєфом літер) та подальшим кріпленням на 4 різних підкладках (папір, плівка, пластик, скло) орієнтовна собівартість становитиме близько 13\$.

Додатково у промислових розрахунках можна враховувати:

- витрати електроенергії;
- амортизацію обладнання;
- можливі додаткові витрати на постобробку (наприклад, видалення підтримок, шліфування);
- відмінність витрат матеріалу (залежить від налаштувань принтера та заповнення).

Однак для одиничного виготовлення ці витрати зазвичай є несуттєвими порівняно з вартістю самого матеріалу та підкладки.

Таким чином, за умови друку одного екземпляра на кожній із чотирьох підкладок орієнтовна собівартість становить приблизно 13–14\$ для 3D-друку, та приблизно 2–4\$ для традиційного виробництва (тиснення). Підсумовуючи, друк матеріалами PLA та ABS-пластиком робить його майже ідеальним для прототипів початкового рівня та освітніх цілей, а також придатним для використання в більш складних моделях [93]. Натомість друк на папері, пластикових матеріалах (підкладках та інших), плівці, ПВХ-матеріалах не рекомендується для технології 3D-друку. Експериментальне дослідження підтвердило це, а зразки були надані дітям для тактильного зчитування інформації. Із усіх створених прототипів на матеріалі PLA пластик виявився найбільш читабельним. Однак слід врахувати важливість проведення постдрукарської обробки крапок Брайля, оскільки крапки на моделях можуть бути гострими, що потенційно небезпечно для дітей, тоді як для дорослих це може бути оптимальним. При створенні тактильних моделей

необхідно враховувати вік незрячих користувачів. У даному випадку рекомендовано використання PLA-матеріалу для виготовлення недорогих тактильних моделей, які можна застосовувати для створення табличок у приміщеннях, для навчальних матеріалів тощо.

4.6. Розробка інформаційної технології формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання та 3D-друку

Завершальним етапом, виконаним у результаті наукового дисертаційного дослідження, стало отримання моделі модель інформаційної технології процесів формування шрифту Брайля та оцінювання якості тактильної 3D-моделі для незрячих людей. Представлена інформаційна модель побудована на основі послідовних кроків, під час яких було сформовано вхідні дані та проведено їх покрокове опрацювання допомогою певних методів і властивостей, що базуються на теоретичних і прикладних засадах з метою отримання результатів належної якості. Проблематикою дослідження є розкриття всіх факторів та процесів, що залежать від вибору методів, які оптимальні для отримання якісних результатів за визначеними критеріями. Підсумовуючи, коротко опишемо суть кроків, які стали предметом і методом дисертаційного дослідження, а також інформаційної технології в процес створення брайлівських моделей за допомогою технології 3D-моделювання в процесах адитивного виробництва. Перший етап полягав у створенні вихідної методологічної та інформаційної бази процесів формування шрифту Брайля для користувачів текстів Брайля. Основні дослідницькі кроки включали:

- аналітичний огляд процесів адитивного виробництва (3D-друку), технологій 3D-моделювання, сучасного стану та перспектив розвитку інформаційних технологій 3D-моделювання, адитивного виробництва та штучного інтелекту. Також розглянуто стан інформаційних технологій формування шрифту Брайля та його використання в інклюзивному середовищі в різних країнах;

- формулювання процесів та різних факторів (матеріали для 3D-друку, шрифт Брайля, програмне забезпечення тощо), які впливають на якість формування шрифту Брайля в процесах адитивного виробництва та 3D-моделювання;

- формування критеріїв та пріоритетних факторів (процесів), які впливають на якість тактильних 3D-моделей із текстами шрифту Брайля. Подальші кроки безпосередньо розкривають сутність інформаційної технології і стали підґрунтям формування інформаційної моделі.

Етап 1. Формування вихідної інформаційної бази та предметної області формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання в процесах адитивного виробництва.

1.1. Побудова моделі дослідження критеріїв та процесів формування шрифту Брайля для осіб із проблемами зору, що систематизує суть та послідовність виконання дослідницьких етапів – основу розроблення інформаційної технології оцінювання якості формування шрифту Брайля на 3D-моделях.

1.2. Експертне виокремлення множини факторів (критеріїв і процесів) пріоритетного впливу на якість формування шрифту Брайля.

1.3. Проєктування семантичної мережі у вигляді графічної альтернативи просторового відображення функціональних і технологічних зв'язків між факторами, пов'язаними з процесами формування шрифту Брайля в технологіях 3D-моделювання та адитивного виробництва.

1.4. Виконання формалізованого опису семантичної мережі засобами мови предикатів.

Етап 2. Розроблення моделей ранжування факторів (критеріїв та процесів) за перевагами їх впливу на якість формування шрифту Брайля.

2.1. Побудова матриць досяжності та визначення рангів факторів (критеріїв та процесів) за результатами опрацювання ітераційних таблиць.

2.2. Синтез багаторівневої моделі пріоритетного впливу факторів (процесів) на якість створення тактильних моделей за методом моделювання ієрархій.

2.3. Побудова матриць попарних порівнянь факторів, які впливають на якість тактильних моделей, та виконання розрахунків за допомогою розробленої програми на мові Python.

2.4. Синтез оптимізованої моделі пріоритетних факторів за критеріями, які впливають на якість формування шрифту Брайля, з урахуванням максимального власного значення додатної обернено-симетричної матриці, індексу узгодженості та відношення узгодженості.

Етап 3. Моделювання аналітичного прогнозування за методом лінійного згортання на основі методу Парето процесів, які впливають на якість формування шрифту Брайля: 1) розподіл факторів множин Парето за принципом важливості на основі їх вагових накопичувальних пріоритетів; 2) проведення прогностичного оцінювання пріоритетних факторів у процесах формування шрифту Брайля.

Етап 4. Проектування нечіткої системи прогностичного оцінювання рівня якості формування шрифту Брайля для незрячих людей, побудованої з використанням засобів теорії нечітких множин. Запроектована модель містить компоненти фазифікації та дефазифікації, які включають: модель логічного виведення; універсальну терм-множину значень; функції належності лінгвістичних змінних; нечітку базу знань; нечіткі логічні рівняння; нечіткі множини на основі нечіткої бази знань; аналітичне вираження прогнозованого результату – інтегрального показника рівня якості формування шрифту Брайля.

Завершальним кроком є фінальне синтезування структурно-функціональної моделі інформаційної технології пріоритетних факторів формування шрифту Брайля за критеріями в процесах адитивного виробництва та характеристик параметрів шрифту Брайля, сутність якої наведено на рис. 4.6.1.

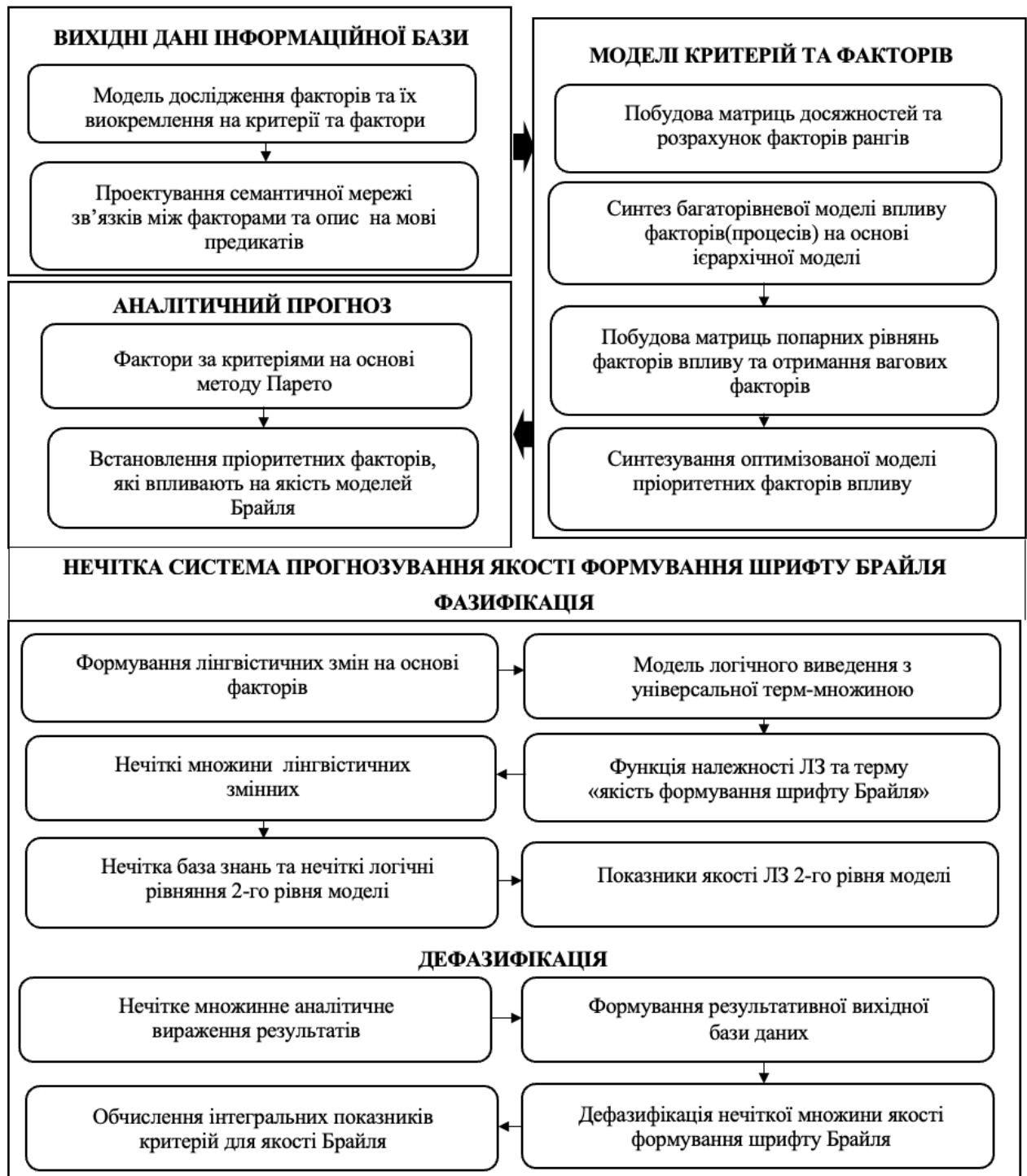


Рис. 4.6.1. Структурно-функціональна модель інформаційної технології оцінювання якості формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання

Висновки до розділу 4

1. Наведено математичне трактування використаних у роботі понять, що становлять основу теорії нечітких множин, а саме: універсальна нечітка множина і її складова – нечітка підмножина, що стосується області визначення змінних; лінгвістичні змінні; функції належності, що визначають зв'язок між елементами нечіткої підмножини ***B*** та універсальної множини ***A***; терм-множини значень; лінгвістичні терми лінгвістичних змінних; матриці нечітких знань; системи нечітких логічних рівнянь.
2. Виконано групування лінгвістичних змінних за функціональними ознаками, що дало змогу створити структуровану вихідну базу даних, яка пов'язує позначення змінної з її лінгвістичною сутністю, межами значень універсальної терм-множини та встановленими лінгвістичними термами, заданими нечіткою тривимірною шкалою, яка відображає якісну властивість змінної.
3. Розроблено ієрархічну модель логічного виведення, яка відтворює багаторівневу ієрархію зв'язків між компонентами вихідної бази даних і визначає алгоритм розрахунку значень функцій належності лінгвістичних змінних з урахуванням лінгвістичних термів.
4. Створено інформаційну вихідну базу даних, яка пов'язує позначення змінної з її лінгвістичною сутністю, межами значень універсальної терм-множини та встановленими лінгвістичними термами, заданими нечіткою тривимірною шкалою, що виражає якісну властивість змінної.
5. Побудовано та опрацьовано матриці попарних порівнянь для лінгвістичних термів лінгвістичних змінних. Визначено ранги лінгвістичних термів, на основі яких розраховано значення функцій належності.
6. Здійснено нормування значень функцій належності лінгвістичних змінних стосовно заданих лінгвістичних термів і їх подання нечіткими множинами, у яких кожна вагомість функції належності належить до відповідної точки

поділу універсальної бази значень. На основі отриманих нечітких множин інших ЛЗ здійснено візуалізацію функцій належності у вигляді суміщених графіків, віднесених до відповідних термів.

7. Сформовано нечіткі матриці знань, базою яких є логічні вирази типу «ЯКЩО УМОВА, ТОДІ РЕЗУЛЬТАТ», та запроєктовано на їх основі системи нечітких логічних рівнянь для лінгвістичних змінних другого рівня ієрархії моделі логічного виведення.
8. На основі логічного оцінювання та експериментальних досліджень пріоритетних факторів впливу на якість формування шрифту Брайля з урахуванням початкових значень лінгвістичних змінних і виконання нормалізації отримано результати, які відображають вплив цих факторів.
9. Виконано дефазифікацію нечіткої множини лінгвістичної змінної S , що ідентифікує інтегральний показник рівня якості формування шрифту Брайля в різних технологіях 3D-друку. Визначено оптимальну технологію для отримання високоякісних брайлівських тактильних моделей, реалізовану на основі нечіткого логічного виведення та системи нечітких логічних рівнянь вказаної змінної. Розрахунок значення показника пріоритетних факторів впливу виконано за методом центра мас плоскої фігури, обмеженої віссю абсцис і графіком функції належності лінгвістичної змінної найвищого рівня. Прогнозований показник оптимальної технології для якісного формування шрифту Брайля: SLA-DLP — 58,2 %, PolyJet — 57,4 %.
10. Проведено експериментальне дослідження з використанням FDM 3D-принтера, матеріалу PLA-пластику, застосовано різні основи для матеріалу (папір із різною товщиною і щільністю, плівка, пластик, PLA-пластик, скло). Визначено оптимальні матеріали для формування шрифту Брайля, обґрунтовано їх переваги та недоліки. Додатково виконано розрахунки вартості створення тактильних прототипів із різних матеріалів.

11. Розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології пріоритетних факторів впливу на формування шрифту Брайля в технологіях 3D-моделювання та оцінювання якості формування тактильного шрифту для незрячих людей, яка включає інформаційну базу вихідних даних, методи й моделі пріоритетних факторів впливу, а також нечітку систему прогностичного оцінювання рівня якості формування шрифту Брайля.

Розділ 5.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ТА АНАЛІЗУ ШРИФТУ БРАЙЛЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ

У проведених дослідженнях, представлених у розділах 2–4, розглянуто процеси створення тактильних моделей із рельєфно-крапковим шрифтом Брайля за допомогою 3D-моделювання та їх відтворення в процесах адитивного виробництва для подальшого застосування у сфері інклюзії. Також проаналізовано фактори, що впливають на якість створення тактильних моделей. У межах цих досліджень було розроблено математичну модель та основу інформаційної технології для визначення факторів, які впливають на якість. У результаті проведеної роботи створено інформаційну систему для генерації шрифту Брайля, а саме – перетворення тексту на 3D-модель і генерація тексту в текст шрифтом Брайля, яка спрощує процес створення 3D-моделей для незрячих людей. Програмне забезпечення має назву «3D Braille CAD» і реалізовано мовою програмування Golang. Перевагою мови Golang є висока продуктивність, компіляція в машинний код, що робить її придатною для створення високонавантажених систем. Крім того, Golang має вбудовану підтримку багатопоточності, конкурентності через goroutines і канали. Такі можливості спрощують створення багатопотокових додатків без складнощів, характерних для інших мов. Компілятор Go дозволяє створювати виконувані файли для різних операційних систем, що необхідно для додатків, які мають працювати на кількох платформах. Крім цього, мова включає стандартну бібліотеку, що містить безліч готових інструментів для роботи з файлами, мережею, базами даних та іншими завданнями, а також забезпечує автоматичне керування пам'яттю. Це програмне забезпечення можна використовувати у процесах адитивного виробництва, оскільки створення цифрової 3D-моделі є тривалим і складним процесом, що знижує ефективність виробництва та збільшує витрати часу. Водночас використання інших додатків потребує додаткового часу для навчання. Розробка «3D Braille CAD» орієнтована як на професійних виробників,

так і на звичайних користувачів з урахуванням мінімізації часу на навчання та можливості швидко створювати й аналізувати тактильні моделі на якість. Це сприятиме задоволенню потреб людей із порушеннями зору та незрячих, активізуючи розвиток інклюзії та доступності. У майбутньому планується розширення функцій цього програмного забезпечення.

5.1. Алгоритми та функції програмного додатка «3D Braille CAD»

3D Braille CAD – це програмне забезпечення, яке генерує введений користувачем текст у шрифт Брайля, з підтримкою кількох мов. Наразі додаток підтримує такі мови: українську, англійську, російську, а також стандартні символи та числа. Додаток також надає можливість перетворення згенерованого тексту шрифтом Брайля на 3D-текст, тобто в рельєфно-крапковий шрифт із налаштуванням параметрів (товщина, ширина, довжина, тип крапки (recessed/raised) з генерацією на стандартну прямокутну модель. У додатку є можливість зберігати згенерований текст шрифтом Брайля у текстовому файлі (.txt). Перетворювати цифрову модель на 3D-об'єкт у файл формату STL. Цей додаток покликаний спростити процес створення тактильних моделей для використання в інклюзії.

Програмне забезпечення включає п'ять функціональних модулів. Основні функціональні можливості додатка «3D Braille CAD»:

- Генерація тексту у шрифт Брайля
- Перетворення згенерованого тексту шрифтом Брайля на стандартну прямокутну 3D-модель із рельєфно-крапковим шрифтом у форматі STL із заданими параметрами (або параметрами за замовчуванням);
- Перетворення цифрового зображення (JPG/PNG) на тривимірну модель у STL форматі;

- Оцінювання якості майбутньої 3D-моделі Брайля з урахуванням типу 3D-друку, вибраного матеріалу, типу шрифту та розмірів крапок шрифту Брайля.
- Перевірка готової 3D-моделі з шрифтом Брайля на відповідність міжнародним стандартам (California Standard, ANSI Standard, ADA Standard, GOST R 56832-2015, IBC International).

Для розробки цього додатка була використана мова програмування Golang, яка забезпечує реалізацію серверної частини та управління за допомогою консольних команд. Перевага цієї мови – створювати високонавантажені і якісні додатки з підтримкою запуску на різних операційних системах (Windows, Linux, MacOS).

Актуальність розробки цього додатка полягає в удосконаленні процесів створення тактильних моделей із рельєфно-крапковим шрифтом Брайля для подальшого використання в інклюзивному середовищі з метою задоволення потреб людей із порушеннями зору та незрячих. Попри наявність додатків для генерації тексту шрифтом Брайля, забезпечують усієї необхідної функціональності та гнучкості, щоб задовольнити потреби виробників. Ці додатки мають свої переваги та недоліки, однак створення індивідуальних якісних інклюзивних тактильних моделей потребує можливості гнучко налаштовувати параметри шрифту Брайля. Саме тому виникла необхідність у створенні нової інформаційної системи, яка дозволить використовувати програмне забезпечення для інклюзії, а саме для створення тактильних моделей, призначених для людей з порушеннями зору та незрячих.

Це програмне забезпечення вирішує проблеми, пов'язані зі створенням тактильних 3D-моделей, зокрема – генерування тексту в шрифт Брайля та його перетворення на тривимірну модель. На рисунку 5.1 подано діаграму процесів і можливостей додатка, яка відображає різні методи використання програмного забезпечення «3D Braille CAD» – від введення тексту для перетворення на

брайлівський шрифт до створення тривимірної тактильної моделі, яку надалі можна надрукувати за допомогою адитивного виробництва й застосовувати у сфері інклюзії.

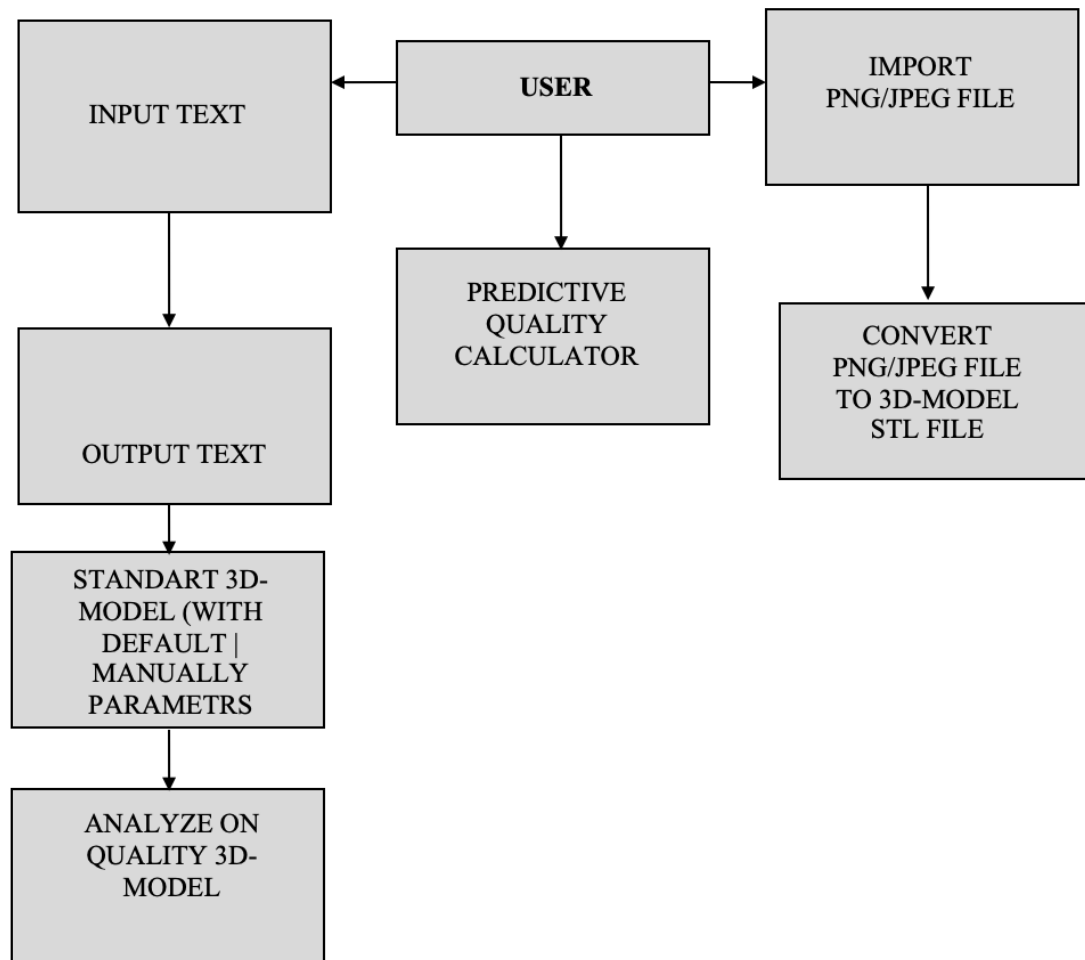


Рис. 5.1.1. Діаграма процесів роботи з програмним забезпеченням «3D Braille CAD»

Отже, розроблене програмне забезпечення «3D Braille CAD», яке дає змогу створювати тактильні моделі зі шрифтом Брайля та генерувати текст для людей із порушеннями зору, поділено на три функціональні блоки, що дозволяє як обирати одну з функцій, так і використовувати весь функціонал додатка одночасно під час створення брайлівських 3D-моделей. Такий додаток є багатофункціональним і дає

змогу уникнути використання кількох різних програм, які ускладнюють процес створення тактильних моделей у виробництві, а також сприяє зменшенню зайвих фінансових витрат. У додатку Д (частина 1) наведено основний код (main.go) файлу:

Наведений приклад основного файлу запуску програми виконує два функціонали: при запуску програми користувач має вибір між прогнозованим калькулятором оцінки якості майбутньої 3D-моделі або генерацією тексту шрифтом Брайля від введення тексту з консолі до генерування його в шрифт Брайля. Для генерації 3D-моделі з тексту передбачено можливість ручного введення значення для параметрів або використання значень за замовчуванням. Після цього система створює STL-файл для 3D-друку з можливістю подальшого аналізу відповідності брайлівської 3D-моделі стандартам. Окремо реалізовано програму для перетворення зображення на тривимірну модель.

5.2. Принцип роботи генерування тексту в шрифт Брайля

У цьому підрозділі розглянуто принцип роботи програмного забезпечення, зокрема його основної функції – генерування тексту, який вводить користувач, у шрифт Брайля (програмний код – 3D Braille CAD, див. у додатку Д):

- Введення тексту. Користувач вводить текст у спеціально визначене поле. Це можуть бути як стандартні символи, так і числа та літери. Наразі додаток підтримує дві мови – українську та англійську.
- Виведення згенерованого тексту в шрифт Брайля. Користувач вводить текст, функція сервісу автоматично розпізнає текст та переводить у шрифт Брайля. Генерація відбувається без підключення до інтернету. Алгоритм розпізнавання реалізується в самому методі, у коді. Це дозволяє уникнути зайвих звернень до баз даних і пришвидшити генерацію тексту.

- Збереження файлу у форматі ТХТ. Додаток дозволяє зберігати згенерований текст шрифтом Брайля у форматі ТХТ. Це дає змогу переглядати введений текст та його відповідник шрифтом Брайля у різних додатках, наприклад, Блокноті.

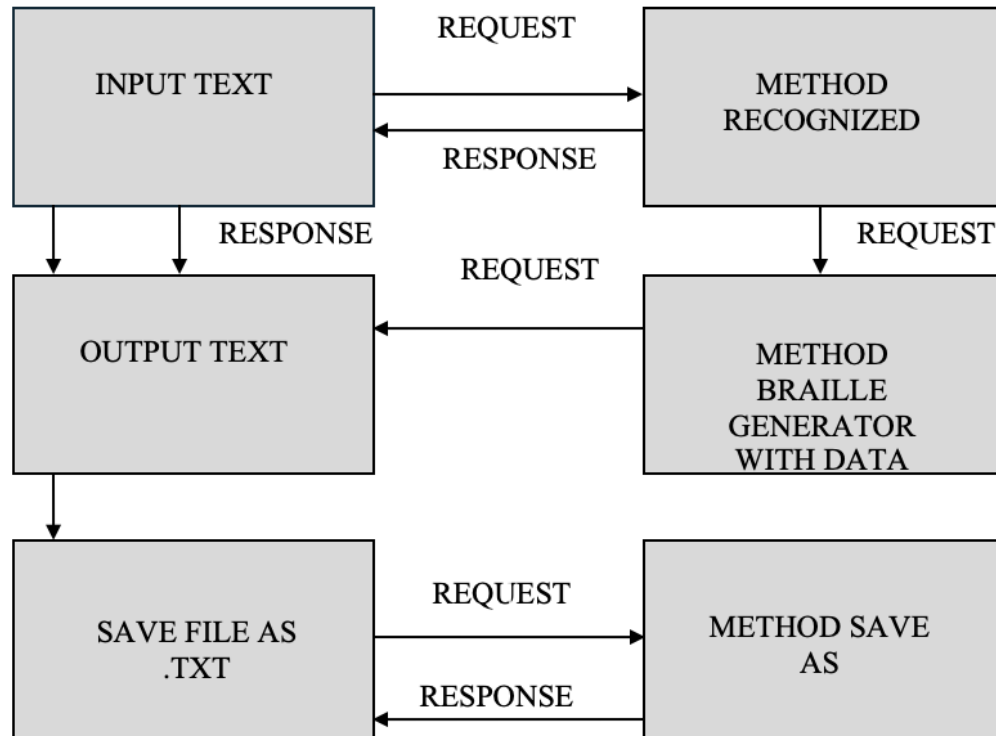


Рис. 5.2.2. Діаграма процесу роботи функції генерування тексту шрифтом Брайля в програмному забезпеченні «3D Braille CAD»

- *Input text* – під час введення тексту користувачем у відповідне поле автоматично розпізнаються мова, символи та цифри. Далі надсилається запит до методу `DetectLanguageManually`, який визначає мову введених символів, перевіряючи їх відповідність певній мові (у цьому випадку – українській). Наступним кроком звертається до методу `GetBrailleMapText`, який завантажує мапу брайлівських символів (див. додаток Д, частина 2, INPUT).
- *Output text* – після розпізнавання мови й символів введеного тексту автоматично генерується текст шрифтом Брайля в реальному часі (див. додаток Д частина 2, OUTPUT).
- *Save file as .txt* – після генерації брайлівського шрифту користувач має змогу зберегти дані в текстовому файлі. Під час збереження надсилається запит до методу `Save As`, який зберігає як уведений користувачем текст, так і згенерований шрифтом Брайля (див. додаток Д, частина, 2 SAVE AS).

5.3. Генерування тривимірної моделі з рельєфно-крапковим шрифтом

У програмному забезпеченні «3D Braille CAD» є можливість перетворення брайлівського шрифту на стандартну прямокутну 3D-модель із можливістю налаштування параметрів (діаметр крапки, висота крапки, відстань між крапками, товщина). Така функціональність дозволяє пришвидшити процес створення брайлівських 3D-моделей в адитивному виробництві. Реалізацію коду наведено в додатку Д, частина 3: «Генерування 3D-моделі».

```
Braille text:
. . .
Would you like to generate a 3D model? (yes/no): yes
Enter text for 3D model: United States of America, 1
Do you want to enter custom parameters for the 3D model? (yes/no): yes
Enter dot radius in mm (default 0.9):
Enter dot height in mm (default 0.5):
Enter symbol spacing in mm (default 6.0):
Enter line spacing in mm (default 10.0):
Enter number of segments for cylinder approximation (default 20):
Enter rectangle width in mm (default 100.0):
Enter rectangle height in mm (default 60.0):
Enter rectangle depth in mm (default 1.0):
Enter file path to save the 3D model (leave blank to save in the current directory):
Do you want the dots to be raised (convex) or recessed (concave)? (enter 'raised' or 'recessed'): raised
Generating Braille model with parameters:
Braille text: 101001 101110 010100 011110 100010 100110 000000 011100 011110 100000 011110 100010 011100 000000 101010 110100 000000 100000 101100 100010 11
1010 010100 100100 100000 001000 000000 100000
Save path: /Users/nikitatarasov/Projects/awesomeProject/braille_model.stl
Dot radius: 0.80
```

Рис. 5.3.1. Скриншот консольного програмного забезпечення «3D Braille CAD»: функція перетворення згенерованого тексту шрифтом Брайля на 3D-модель із можливістю налаштування параметрів

Після перетворення тексту на шрифт Брайля та зберігання його у файлі текстового формату .TXT у консолі програма запитує про продовження операції – генерування тексту шрифтом Брайля у вигляді 3D-моделі. Далі користувач вводить текст, який необхідно згенерувати на тривимірну модель. Наступним кроком є вибір: ввести специфічні параметри вручну або використовувати параметри за замовчуванням, а саме:

```

dotRadius = modeling.DefaultDotRadius=0.8mm
dotHeight = modeling.DefaultDotHeight=0.5mm
symbolSpacing = modeling.DefaultSymbolSpacing=3.0mm
lineSpacing = modeling.DefaultLineSpacing=5.0mm
numSegments = modeling.DefaultNumSegments=20mm
rectangleSize.Width = modeling.DefaultRectangleWidth=100.0mm
rectangleSize.Height = modeling.DefaultRectangleHeight=60.0mm
rectangleSize.Depth = modeling.DefaultRectangleDepth=1.0mm

```

Після вибору параметрів – за замовчуванням або зі встановленням специфічних значень програма надсилає запит щодо типу крапок шрифту Брайля:

«Do you want the dots to be raised (convex) or recessed (concave) (enter 'raised' or 'recessed')». Необхідно обрати тип крапок: raised (випуклий випуклі) або recessed (втоплений втоплені). Після цього відбувається генерування крапок шрифту Брайля на 3D-модель.

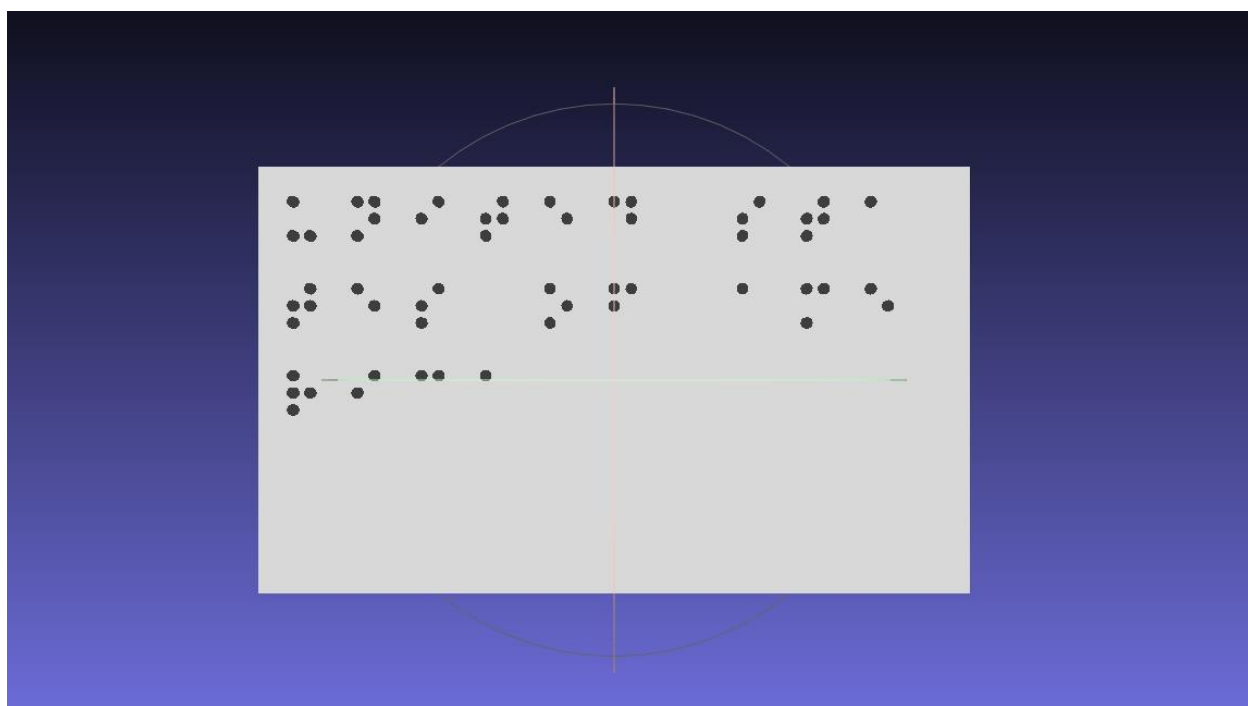


Рис. 5.3.2. Згенерована 3D-модель із текстом Брайля за допомогою програми «3D Braille CAD»

Нижче наведено принцип роботи коду, що відповідає за генерування тексту в 3D-модель з рельєфно-крапковим шрифтом Брайля. На першому етапі задаємо константи – параметри за замовчуванням, які використовуються під час генерації 3D-моделі. Далі функція **func getUniqueFilename** обере шлях до директорії, де необхідно зберегти файл, і якщо файл з іменем `braille_model.stl` вже існує, до його назви додається (+1). Наступним є метод **func GenerateBrailleModel(brailleText, outputPath string, dotRadius, dotHeight, symbolSpacing, lineSpacing float64, numSegments int, rectangleSize, isConvex bool) error {**. Ця функція є основною для перетворення тексту шрифтом Брайля на 3D-моделі та генерації в STL-формат. Наразі програма генерує лише прямокутні (квадратні) тривимірні моделі. У майбутньому планується розширення функціонала та підтримка різних тривимірних моделей (див. додаток Д, частина 3 «Генерування 3D-моделі»).

Завдяки використанню програмного коду, написаного мовою Golang, вдалося створити ефективне програмне забезпечення для швидкого генерування тривимірних моделей зі шрифтом Брайля. Це дозволяє скоротити час на освоєння програми, забезпечити її швидкий запуск на будь-якій операційній системі та спростити процес створення простих тактильних 3D-моделей.

5.4. Принцип роботи сервісу аналізу тривимірної моделі з текстом Брайля на відповідність стандартам

Після генерації тривимірної моделі з текстом Брайля буде запропоновано виконати аналіз 3D-моделі у форматі STL на відповідність стандартам шрифту Брайля для 3D-моделей.

```
Would you like to analyze the 3D model? (yes/no): yes
Do you want to analyze the default STL file in the current directory? (yes/no): yes
Error analyzing 3D model: error: Point radius (37.27 mm) is not as expected (0.50 mm)
```

Рис. 5.4.1. Принцип роботи аналізатора відповідності стандартам шрифту Брайля на тривимірній моделі

Аналізатор має встановлені параметри для шрифту Брайля, які порівнюють стандартні значення, закладені в програмному коді, із характеристиками тривимірної моделі у форматі STL.

```
const (
    expectedDotRadius    = 0.5
    expectedDotHeight    = 1.0
    expectedSymbolSpacing = 3.0
    tolerance            = 0.1
)
```

Також можна обрати директорію до файлу за замовчуванням або вручну вказати шлях до файлу для проведення аналізу. У додатку Д, частина 4 «Аналізатор моделей», наведено принцип роботи аналізатора в програмному коді. Ці можливості сервісу аналізатора дозволяють перевіряти відповідність тривимірних моделей стандартам шрифту Брайля.

5.5. Принцип роботи сервісу «Калькулятор прогнозування» для оцінки якості майбутньої 3D-моделі з текстом Брайля

При початковому запуску програми з консолі пропонується обрати одну з двох опцій: 1 – генерування тексту в шрифт Брайля або 2 – «Калькулятор прогнозування». Після вибору користувач вводить текст і встановлює параметри з різними значенням, які мають певний інтервал (від мінімуму до максимуму). Якщо введене значення більше або менше за встановлений проміжок, виводиться повідомлення про помилку (Invalid). Реалізація «Калькулятора прогнозування» наведена в додатку Д (частина 5 «Калькулятор прогнозування»).

```

Choose an option:
1 - Enter text
2 - Run calculator
3 - Run predictive calculator
3
Choose a 3D printing technology:
1. SLA-DLP
2. PolyJet
3. SLS
4. FDM-FFF
Enter your choice: 1
Choose a material for SLA-DLP:
1. Standard Resin
2. Flexible Resin
3. Clear Resin
Enter your choice: 2
Enter the Braille text you want to print: " : "
Choose a Braille font:
1. Braille-3D Font
2. Braille Embossing Font
3. Braille Standard Font
Enter your choice: 1
Enter the following parameters:
Temperature (°C) (20.00 - 300.00): 300

```

```

Enter Braille grid size (e.g., 2x3): 2x4
Braille cell size (mm) (1.00 - 5.00): 6
Warning: The value 6.00 exceeds the standard range. Do you want to continue? (yes/no): yes
Dot height (mm) (0.10 - 1.00): 1
Dot diameter (mm) (0.80 - 2.00): 2
Spacing between dots (mm) (0.50 - 2.50): 2
Spacing between cells (mm) (2.00 - 5.00): 2
Grid size (mm) (2.00 - 4.50): 2

--- Results ---
Braille Text: " : "
Material: Flexible Resin
Font: Braille-3D Font
Overall Quality: 77.07%
Quality Level: High

```

Рис. 5.5.1. Принцип роботи консольного сервісу «Calculator Predictive» («3D Braille CAD») для оцінювання якості майбутньої тривимірної моделі з текстом Брайля

Сервіс калькулятор прогнозування має такі параметри вибору технології 3D-друку:

Choose a 3D printing technology:

1. SLA-DLP
2. PolyJet
3. SLS

4. FDM-FFF

Choose a material for SLA-DLP:

1. Standard Resin
2. Flexible Resin
3. Clear Resin

Enter the Braille text you want to print: ∴ ∴ ∴

Choose a Braille font:

1. Braille-3D Font
2. Braille Embossing Font
3. Braille Standard Font

Enter the following parameters:

Temperature (°C) (20.00 – 300.00): 300

Enter Braille grid size (e.g., 2x3): 2x4

Braille cell size (mm) (1.00 – 5.00): 6

Warning: The value 6.00 exceeds the standard range. Do you want to continue?
(yes/no): yes – якщо користувач вводить значення більше за стандартний діапазон, програма запускає попередження. У цьому випадку користувач повинен підтвердити, чи дійсно хоче ввести значення більше за стандартне.

Dot height (mm) (0.10 – 1.00):

Dot diameter (mm) (0.80 – 2.00):

Spacing between dots (mm) (0.50 – 2.50):

Spacing between cells (mm) (2.00 – 5.00):

Grid size (mm) (2.00 – 4.50):

Після підтвердження виводиться результат оцінки якості 3D-моделі (для прикладу):

--- Results ---

Braille Text: ∴ ∴ ∴

Material: Flexible Resin

Font: Braille-3D Font

Overall Quality: 77.07%

Quality Level: High

У додатку Д, частина 5, наведено програмний код сервісу «Калькулятор прогнозування».

Завдяки сервісу «Калькулятор прогнозування» можна передбачити якість майбутньої тривимірної моделі з урахуванням різних параметрів та вибору різних технологій 3D-друку (SLA-DLP, PolyJet, FDM-FFF, SLS).

5.6. Перспективи інтеграції штучного інтелекту у ПЗ для генерації шрифту Брайля та 3D-моделювання

Штучний інтелект активно інтегрується в різні технології та в програмне забезпечення, стаючи невід’ємною частиною сучасного суспільства. Він змінює принципи роботи програмних систем, дозволяючи автоматизувати процеси, що раніше виконувались вручну. Це значно скорочує час виконання завдань та покращує якість результатів. Застосування штучного інтелекту у технологіях 3D-моделювання з формуванням шрифту Брайля на тривимірних об’єктах дозволить автоматизувати операції, які раніше виконували виключно фахівці. Водночас варто враховувати, що ШІ має певні обмеження і не є досконалим: він може помилятися, тому важливо, щоб людина контролювала процеси штучного інтелекту, вчасно запобігаючи помилкам. Інтеграція штучного інтелекту у процеси виробництва є однією з провідних сучасних технологій. Для впровадження ШІ в додаток «3D Braille CAD» необхідно обрати відповідні сервіси ШІ, які зможуть оптимізувати програмне забезпечення. Для цього вирішення пропонується інтеграція таких сервісів, як: OpenAI GPT (через Golang-бібліотеку github.com/sashabaranov/go-openai), OpenCV, Microsoft Azure, Amazon SageMaker AI та Amazon Bedrock AI (github.com/build-on-aws/amazon-bedrock-go-sdk-examples). Ці інструменти можуть покращити функції «генерування шрифту Брайля та формування 3D-моделі»;

«аналіз 3D-моделі зі шрифтом Брайля на відповідність встановленим стандартам (відстань між символами, радіус і висота крапок); онлайн-калькулятор прогнозування з оцінкою якості майбутньої 3D-моделі з урахуванням різних параметрів і технологій 3D-друку. Оскільки кожна із цих систем має переваги та недоліки, необхідно провести детальне дослідження для вибору оптимальних рішень. Розгляньмо приклади прототипування інтеграції різних технологій ІІІ у додаток «3D Braille CAD» та їх застосування у функціях додатка.

- Інтегрування функції розпізнавання тексту з перетворенням на шрифт Брайля з розширенням підтримки різних мов, а також додаванням розпізнавання зображень і генерування тексту Брайля методом описом за допомогою NLP (Natural language processing) у функціях **DetectLanguageManually** та **GenerateBrailleText**. Нижче наведено прототип коду інтегрованого ІІІ OpenAI GPT у ці методи:

```
const openAIAPIKey = "VALUE_OPENAI_API_KEY"
```

```
const openAIEndpoint = https://api.openai.com/v1/engines/davinci-codex/completions
```

```
type OpenAIRequest struct {
    Prompt string `json:"prompt"`
    MaxTokens int `json:"max_tokens"`
}
type OpenAIResponse struct {
    Choices []struct {
        Text string `json:"text"`
    } `json:"choices"`
}
func callOpenAI(prompt string) (string, error) {
    requestBody, err := json.Marshal(OpenAIRequest{
        Prompt: prompt,
        MaxTokens: 100,
    })
    if err != nil {
        return "", err
    }
    req, err := http.NewRequest("POST", openAIEndpoint,
```

```

bytes.NewBuffer(requestBody))
if err != nil {
return "", err
}
req.Header.Set("Content-Type", "application/json")
req.Header.Set("Authorization", "Bearer " + openAIAPIKey)
client := &http.Client{}
resp, err := client.Do(req)
if err != nil {
return "", err
}
defer resp.Body.Close()
body, err := ioutil.ReadAll(resp.Body)
if err != nil {
return "", err
}
var openAIResp OpenAIResponse
err = json.Unmarshal(body, &openAIResp)
if err != nil {
return "", err
}
if len(openAIResp.Choices) > 0 {
return openAIResp.Choices[0].Text, nil
}
return "", fmt.Errorf("no response from OpenAI")
}
func detectLanguageAndGenerateBraille(inputText string) (string, string, error) {
    langPrompt := fmt.Sprintf("Detect the language of the following text: %s", inputText)
    lang, err := callOpenAI(langPrompt)
    if err != nil {
return "", "", err
    }
    braillePrompt := fmt.Sprintf("Convert the following text to Braille: %s", inputText)
    brailleText, err := callOpenAI(braillePrompt)
    if err != nil {
return "", "", err
    }
return lang, brailleText, nil
}
func saveToFile(filename, originalText, brailleText string) error {
    content := fmt.Sprintf("Original text:\n%s\n\nBraille text:\n%s\n", originalText,
brailleText)

```

```

return ioutil.WriteFile(filename, []byte(content), 0644)
}
func main() {
var inputText string
    fmt.Println("Enter text:")
    fmt.Scanln(&inputText)
    lang, brailleText, err := detectLanguageAndGenerateBraille(inputText)
if err != nil {
    fmt.Println("Error:", err)
return
}
    fmt.Println("Detected language:", lang)
    fmt.Println("Braille text:", brailleText)
    err = saveToFile("braille_output.txt", inputText, brailleText)
if err != nil {
    fmt.Println("Error saving to file:", err)
}
}

```

- Генерування різноманітних і складних тривимірних об'єктів з текстом Брайля в методі **GenerateBrailleModel**. Інтеграція штучного інтелекту в цю функцію дозволить покращити якість створення тактильних 3D-моделей, які адаптуватимуться під різні вимоги, генеруватимуть складні тексти шрифтом Брайля та об'єкти для незрячих користувачів. Також штучний інтелект зможе виявляти проблеми та недоліки під час генерації 3D-моделі, надавати попередження та рекомендації щодо їх усунення, виконувати автоматичне виправлення помилок.

```

type RectangleSize struct {
    Width, Height, Depth float64
}

func GenerateBrailleModel(brailleText, outputPath string, dotRadius, dotHeight,
symbolSpacing, lineSpacing float64, numSegments int, rectangleSize, isConvex
bool) error {

```

```

// Initialize OpenAI client
client := openai.NewClient(os.Getenv("OPENAI_API_KEY"))

// Use OpenAI GPT-3 to process the brailleText and recommend 3D printing
parameters
ctx := context.Background()
req := openai.CompletionRequest{
    Model: "text-davinci-003",
    Prompt: fmt.Sprintf("Analyze the following Braille text and recommend 3D
printing parameters for SLS, SLA, and FDM technologies:\n\n%s", brailleText),
    MaxTokens: 150,
}
resp, err := client.CreateCompletion(ctx, req)
if err != nil {
return fmt.Errorf("failed to get completion from OpenAI: %w", err)
}

// Parse the response to get recommended parameters
recommendedParams := parseOpenAIResponse(resp.Choices[0].Text)

// Create a new STL solid
solid := stl.NewSolid("BrailleModel")

// Add the rectangle base to the solid
addRectangleBaseToSolid(solid, rectangleSize.Width, rectangleSize.Height,
rectangleSize.Depth)

// Add Braille dots to the solid based on the brailleText

```

```

addBrailleDotsToSolid(solid, brailleText, dotRadius, dotHeight, symbolSpacing,
lineSpacing, numSegments, isConvex)

// Save the STL file
err = solid.Save(outputPath)
if err != nil {
return fmt.Errorf("failed to save STL file: %w", err)
}

    fmt.Printf("3D model saved to %s\n", outputPath)
return nil
}

```

- Інтегрування OpenAI GPT у сервіс аналізу згенерованої 3D-моделі на відповідність встановленим стандартам дозволить проводити більш детальний аналіз тактильних моделей з урахуванням стандартів і якості. Крім того, сервіс зможе враховувати тип 3D-друку та матеріал, який буде використовуватись для друкування 3D-моделі.

```

func AnalyzeBrailleModel(stlFilePath string, printingTechnology string) error {
// Open the STL file
file, err := os.Open(stlFilePath)
if err != nil {
return fmt.Errorf("error opening STL file: %w", err)
}
defer file.Close()

// Parse the STL file
solid, err := stl.ReadAll(file)
if err != nil {
return fmt.Errorf("error reading STL file: %w", err)
}

// Extract relevant information from the STL file

```

```

modelInfo := extractModelInfo(solid)

// Generate a prompt for GPT
prompt := generatePrompt(modelInfo, printingTechnology)

// Set up the OpenAI API client
client := openai.NewClient(os.Getenv("OPENAI_API_KEY"))

// Call the OpenAI API
response, err := client.Completion.Create(openai.CompletionRequest{
    Model:    "text-davinci-003",
    Prompt:   prompt,
    MaxTokens: 500,
})
if err != nil {
    return fmt.Errorf("error calling OpenAI API: %w", err)
}

// Process the response
recommendations := response.Choices[0].Text
    fmt.Println("Recommendations:", recommendations)

return nil
}

/ extractModelInfo extracts information from an stl.Solid object and returns it as a
string
func extractModelInfo(solid *stl.Solid) string {
    var info string
    info += fmt.Sprintf("Model Name: %s\n", solid.Name)
    info += fmt.Sprintf("Number of Triangles: %d\n", len(solid.Triangles))

    // Calculate the bounding box
    var minX, minY, minZ, maxX, maxY, maxZ float32
    if len(solid.Triangles) > 0 {
        minX, minY, minZ = solid.Triangles[0].Vertices[0].X,
solid.Triangles[0].Vertices[0].Y, solid.Triangles[0].Vertices[0].Z
        maxX, maxY, maxZ = minX, minY, minZ
    }

    for _, triangle := range solid.Triangles {
        for _, vertex := range triangle.Vertices {

```

```

if vertex.X < minX {
    minX = vertex.X
}
if vertex.Y < minY {
    minY = vertex.Y
}
if vertex.Z < minZ {
    minZ = vertex.Z
}
if vertex.X > maxX {
    maxX = vertex.X
}
if vertex.Y > maxY {
    maxY = vertex.Y
}
if vertex.Z > maxZ {
    maxZ = vertex.Z
}
}
}
info += fmt.Sprintf("Bounding Box:\n")
info += fmt.Sprintf("  Min: (%.2f, %.2f, %.2f)\n", minX, minY, minZ)
info += fmt.Sprintf("  Max: (%.2f, %.2f, %.2f)\n", maxX, maxY, maxZ)
return info
}

func generatePrompt(modelInfo, printingTechnology string) string {
// Generate a prompt for GPT
return fmt.Sprintf(`Analyze the following 3D Braille model for quality and
readability: Model Information: %s Printing Technology: %s Provide
recommendations for improving the model quality, ensuring readability for blind
users, and any other relevant insights.`, modelInfo, printingTechnology)
}

```

- Інтегрування ІІІ в сервіс калькулятор-прогнозування якості майбутньої 3D-моделі дозволить підвищити якість прогнозування, враховуючи різноманітні фактори, які впливають на якість друку. Крім того, сервіс зможе виконувати машинне навчання на основі результатів друкованих об'єктів.

```

• type Parameters struct {
    BrailleText      string
    DotDiameter      float64
    DotHeight        float64
    DotSpacing       float64
    GridSize         int
    PrintingType     string
    Material         string
    LayerResolution  float64
    LayerThickness   float64
    PrintingTemperature float64
}
type OpenAIResponse struct {
    Choices []struct {
        Text string `json:"text"`
    } `json:"choices"`
}
func getOpenAIRecommendations(params Parameters) (string, error) {
    apiKey := os.Getenv("OPENAI_API_KEY")
    if apiKey == "" {
        return "", fmt.Errorf("OPENAI_API_KEY environment variable not set")
    }
    prompt := fmt.Sprintf(`Analyze the following 3D printing parameters and
provide a detailed quality prediction and recommendations:
Braille text: %s
Dot diameter: %.2f mm
Dot height: %.2f mm
Dot spacing: %.2f mm
Grid size: %d dots
Printing type: %s
Material: %s
Layer resolution: %.2f microns
Layer thickness: %.2f mm
Printing temperature: %.2f °C
`, params.BrailleText, params.DotDiameter, params.DotHeight,
params.DotSpacing, params.GridSize, params.PrintingType, params.Material,
params.LayerResolution, params.LayerThickness, params.PrintingTemperature)
    requestBody, err := json.Marshal(map[string]interface{} {
        "model": "text-davinci-003",
        "prompt": prompt,
        "max_tokens": 150,
    })

```

```

if err != nil {
    return "", err
}
req, err := http.NewRequest("POST", "https://api.openai.com/v1/completions",
bytes.NewBuffer(requestBody))
if err != nil {
    return "", err
}
req.Header.Set("Content-Type", "application/json")
req.Header.Set("Authorization", "Bearer "+apiKey)
client := &http.Client{}
resp, err := client.Do(req)
if err != nil {
    return "", err
}
defer resp.Body.Close()
body, err := ioutil.ReadAll(resp.Body)
if err != nil {
    return "", err
}
var openAIResponse OpenAIResponse
err = json.Unmarshal(body, &openAIResponse)
if err != nil {
    return "", err
}
if len(openAIResponse.Choices) == 0 {
    return "", fmt.Errorf("no response from OpenAI")
}
return openAIResponse.Choices[0].Text, nil
}

func PrintQualityAssessment(params Parameters) {
    // Perform quality assessment
    fmt.Println("\nQuality Assessment:")
    fmt.Printf("Braille text: %s\n", params.BrailleText)
    fmt.Printf("Dot diameter: %.2f mm\n", params.DotDiameter)
    fmt.Printf("Dot height: %.2f mm\n", params.DotHeight)
    fmt.Printf("Dot spacing: %.2f mm\n", params.DotSpacing)
    fmt.Printf("Grid size: %d dots\n", params.GridSize)
    fmt.Printf("Printing type: %s\n", params.PrintingType)
    fmt.Printf("Material: %s\n", params.Material)
    fmt.Printf("Layer resolution: %.2f microns\n", params.LayerResolution)
    fmt.Printf("Layer thickness: %.2f mm\n", params.LayerThickness)
}

```

```

    fmt.Printf("Printing temperature: %.2f °C\n", params.PrintingTemperature)
    // Get recommendations from OpenAI
    recommendations, err := getOpenAIRecommendations(params)
    if err != nil {
        fmt.Printf("Error getting recommendations: %v\n", err)
        return
    }
    fmt.Printf("Recommendations: %s\n", recommendations)
}

```

- Для сервісу конвертування зображень (PNG, JPG) оптимальним рішенням є використання інструментів Amazon, зокрема бібліотеки github.com/aws/aws-sdk-go/ у частині коду в `service/rekognition`. Цей інструмент є оптимальним для функції конвертування у 3D-модель. Amazon Rekognition дозволяє розпізнавати об'єкти на різних зображеннях. Проте недоліком цього сервісу є відсутність підтримки генерації із зображення у 3D-модель із текстом Брайля. Так само OpenAI GPT не призначений для розпізнавання зображень та конвертації їх у тривимірну модель. Тому для вирішення цих завдань необхідно застосовувати інші підходи, зокрема створення альтернативних систем штучного інтелекту. Необхідно розробити систему Braille OCR, яка б розпізнавала текст Брайля на зображеннях, або навчити відповідну модель на спеціалізованих даних. Одним із можливих варіантів є використання бібліотеки OpenCV – інтерфейсу для комп'ютерного зору, який можна застосовувати для опрацювання зображень, виявлення тексту Брайля, а також визначення контурів тривимірної моделі, і після цього можна генерувати 3D-модель у форматі STL. Нижче наведено приклад коду реалізації такої моделі:

```

const (
    dotRadius    = 0.8
    dotHeight    = 0.5
    symbolSpacing = 3.0
    numSegments  = 20
    isConvex     = true
)
func main() {
    imgPath := "input.jpg"

```

```

outputPath := "output.stl"
img := loadImage(imgPath)
if img == nil {
    fmt.Println("Error loading image")
return
}
err := GenerateBrailleModelFromImage(img, outputPath, dotRadius, dotHeight,
symbolSpacing, numSegments, isConvex)
if err != nil {
    fmt.Println("Error generating 3D model:", err)
}
}
func loadImage(filePath string) image.Image {
    file, err := os.Open(filePath)
if err != nil {
    fmt.Println("Error opening file:", err)
return nil
}
defer file.Close()
var img image.Image
switch strings.ToLower(filePath[strings.LastIndex(filePath, ".")+1:]) {
case "jpg", "jpeg":
    img, err = jpeg.Decode(file)
case "png":
    img, err = png.Decode(file)
default:
    fmt.Println("Unsupported file format")
return nil
}
if err != nil {
    fmt.Println("Error decoding image:", err)
return nil
}
return img
}
func GenerateBrailleModelFromImage(img image.Image, outputPath string,
dotRadius, dotHeight, symbolSpacing float64, numSegments int, isConvex bool)
error {
    grayImg := gocv.NewMat()
defer grayImg.Close()
    gocv.CvtColor(gocv.NewMatFromImage(img), &grayImg,
gocv.ColorBGRToGray)

```

```

// Detect Braille dots (simple thresholding for demonstration)
gocv.Threshold(grayImg, &grayImg, 128, 255, gocv.ThresholdBinary)
// Find contours
contours := gocv.FindContours(grayImg, gocv.RetrievalExternal,
gocv.ChainApproxSimple)
// Create a new Solid object
solid := stl.Solid{Name: "BrailleModel"}
for _, contour := range contours {
    rect := gocv.BoundingRect(contour)
    x := float64(rect.Min.X)
    y := float64(rect.Min.Y)
    addCylinderToSolid(&solid, x, y, 0, dotRadius, dotHeight, numSegments,
isConvex)
}
// Save the STL file
fileOutput, err := os.Create(outputPath)
if err != nil {
    return fmt.Errorf("error creating file: %w", err)
}
defer fileOutput.Close()
err = solid.WriteAll(fileOutput)
if err != nil {
    return fmt.Errorf("error writing STL file: %w", err)
}
fmt.Printf("3D model saved to %s\n", outputPath)
return nil
}

```

На основі проведеного аналізу інтегрування штучного інтелекту в програмне забезпечення «3D Braille CAD» є одним із оптимальних рішень, який дозволить покращити функціонал додатка забезпечить отримання якісних і точних результатів під час створення брайлівських моделей. Є безліч сервісів, які надають готові рішення з різними моделями штучного інтелекту, зокрема Amazon Bedrock, Amazon Rekognition, Microsoft Azure, OpenAI GPT, Google Cloud, AWS Sage Maker, OpenCV. Проаналізуємо можливості цих технології і їх переваги для інтеграції в додаток «3D Braille CAD»:

- Google Cloud Vision API: надає можливості для розпізнавання тексту (OCR) та виявлення об'єктів. Завдяки цьому сервісу можна створювати й навчати власні моделі для розпізнавання символів Брайля за допомогою AutoML Vision, для мови Go доступні клієнтські бібліотеки. Підходить для інтегрування у функцію конвертації зображення (JPG, PNG) у 3D-модель, проте необхідна додаткова реалізація або розширення моделі III для конвертації у 3D-модель та генерування у формат STL. Загалом Google Cloud є комплексною платформою для машинного навчання, що надає інструменти для навчання, розгортання та керування моделями. Це оптимальне рішення для навчання моделей машинного навчання з метою аналізу якості 3D-моделей, створення прогностичного калькулятора, часткового розпізнавання Брайля з використанням AutoML Vision, який можна застосовувати для навчання моделей розпізнавання символів Брайля на зображеннях. Натомість Custom Training дає змогу навчати користувацькі моделі машинного навчання для аналізу геометричних характеристик 3D-моделей і передбачення їх якості. Також доступний додатковий інструмент – AI Platform Prediction, який дає змогу розгортати навчені моделі для аналізу якості та прогнозування. Переваги Google Cloud: наявність інструментів для машинного навчання, інтеграція з іншими сервісами Google Cloud, масштабованість. Недоліками є необхідність мати певні знання у сфері машинного навчання і відносно висока вартість використання.
- Amazon Rekognition: аналог сервісу Google Cloud Vision API, який надає інструменти аналізу зображень, зокрема виявлення об'єктів і розпізнавання тексту. Підтримує створення користувацьких моделей (доступна SDK для Go). Підходить для інтегрування у функцію конвертації зображень (JPG, PNG) у 3D-модель, проте потребує

додаткової реалізації або розширення моделі ШІ для конвертації зображення у 3D-модель та генерації у формат STL. Переваги: простота використання, масштабованість, можливість навчання користувацьких моделей. Недоліки: стандартний OCR не підходить для розпізнавання шрифту Брайля, необхідність навчання користувача користувацьких моделей, точність залежить від якості навчальних даних.

- Microsoft Azure AI Vision (Cognitive Services): надає широкий спектр можливостей комп'ютерного зору, зокрема Custom Vision для навчання власних моделей розпізнавання об'єктів (крапок Брайля). Доступна SDK для Go. Custom Vision: дозволяє навчати моделі для виявлення об'єктів (крапок Брайля), класифікувати зображення (визначення символів Брайля), використовувати API для аналізу зображень, включаючи виявлення об'єктів і, можливо, дефектів у 3D-моделях. Microsoft Azure Machine Learning зосереджений на навчанні моделей для аналізу якості 3D-моделей і створення прогностичних обчислень. Сервіс Microsoft Azure є оптимальним рішенням в інтеграції програми. Його основні переваги: широкий спектр сервісів, інтеграція з іншими сервісами Azure, наявність потужних інструментів для машинного навчання. Недоліки: складність налаштування та управління, вартість використання може бути значною.
- OpenCV (через GoCV): OpenCV – це бібліотека комп'ютерного зору з відкритим вихідним кодом. GoCV надає інтерфейс для роботи з OpenCV мовою Go. Цю бібліотеку доцільно використовувати для реалізації власних алгоритмів розпізнавання шрифту Брайля на зображеннях, а також для аналізу геометричних характеристик 3D-моделей для інтеграції із наперед навченими моделями. OpenCV здатна виявляти контури та форми на основі навчених алгоритмів для виявлення і виділення крапок Брайля. Реалізація алгоритмів машинного

навчання відбувається через інтеграцію з бібліотеками машинного навчання (наприклад, TensorFlow, PyTorch) через OpenCV для навчання й застосування моделей розпізнавання. Можливості функцій OpenCV дозволяють виконувати аналіз 3D-моделей для виявлення дефектів або оцінки якості. Це є одним з оптимальних рішень для перетворення зображень на 3D-модель із текстом Брайля у форматі STL. Переваги: безкоштовність та відкритий вихідний код, широкий набір алгоритмів, гнучкість і контроль над процесом. Недоліки: потребує глибоких знань у галузі комп'ютерного зору та програмування, розроблення та оптимізація алгоритмів може бути трудомісткою.

- OpenAI GPT (через Azure OpenAI Service або OpenAI API): цей сервіс пропонує потужні мовні моделі, здатні генерувати текст, перекладати мови, виступати в ролі асистента та ін. OpenAI є обмеженим у прямому застосуванні до розпізнавання шрифту Брайля або аналізу 3D-моделей, але може бути корисним для завдань, пов'язаних із текстом. Він може генерувати текстову інформацію, наприклад, для створення текстових описів 3D-моделей Брайля. Його переваги: висока якість генерації тексту, широкі можливості застосування у галузі обробки природної мови (NLP). Недоліки: не призначений для безпосередньої обробки зображень або 3D-даних а вартість використання може бути високою.
- AWS SageMaker: це платформа для створення, навчання та розгортання моделей машинного навчання. Підходить для тих самих завдань, що й Google Cloud AI Platform: навчання моделей для аналізу якості 3D-моделей, прогнозування їхніх властивостей, а також розпізнавання символів Брайля. Переваги: широкий набір інструментів для машинного навчання, інтеграція з іншими сервісами AWS, гнучкість.

Недоліки: потребує певних знань у галузі машинного навчання, складність налаштування та управління.

Переваги інтеграції ІІІ у додаток «3D Braille CAD» для створення тактильних 3D-моделей: підвищення точності розпізнавання шрифту Брайля. Використання моделей комп'ютерного зору дозволяє більш точно та надійно розпізнавати шрифт Брайля на зображеннях навіть за наявності шумів, спотворень або різних стилів написання; автоматизація аналізу якості 3D-моделей: моделі машинного навчання можуть автоматично аналізувати геометричні характеристики 3D-моделей та виявляти потенційні дефекти, що суттєво економить час і зусилля користувача; поліпшення якості та точності прогнозування. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє створювати більш точні калькулятори для оцінки часу друку і витрат матеріалів; розширення можливостей програми. Інтеграція ІІІ дозволяє додати нові функції, зокрема автоматичного перетворення зображень на 3D-модель зі шрифтом Брайля, що значно розширює можливості програми; поліпшення досвіду користувача: інтелектуальні функції, такі як автоматичне виправлення помилок або надання рекомендацій, роблять додаток «3D Braille CAD» або інші додатки більш зручними та інтуїтивно зрозумілими.

Недоліки інтеграції ІІІ: складність розробки та інтеграції. Інтеграція AI-сервісів потребує спеціальних знань і навичок у галузі машинного навчання та роботи з відповідними API; необхідність даних для навчання: для ефективної роботи моделей ІІІ потрібна велика кількість розмічених даних для навчання, що вимагає часу, ресурсів і зусиль; обчислювальні ресурси: навчання та використання складних моделей ІІІ може потребувати значних обчислювальних ресурсів, що впливатиме на вартість і продуктивність програми; потенційні помилки та неточності: моделі ІІІ не завжди працюють бездоганно й можуть припускатися помилок, особливо в нових або нестандартних ситуаціях; залежність від зовнішніх сервісів: Використання хмарних AI-платформ створює залежність від їхньої доступності та вартості.

Враховуючи, що програму написано мовою Golang, при виборі AI-сервісів доцільно надавати перевагу тим, які мають SDK або API на Go або добре документовані REST API, з яким можна взаємодіяти за допомогою Go.

Для розпізнавання зображень шрифту Брайля:

1. Amazon Rekognition – оптимальний вибір завдяки простоті використання та можливості навчання власних моделей.
2. Google Cloud Vision API – сервіс із можливістю AutoML Vision для навчання моделей розпізнавання шрифту Брайля.
3. Microsoft Azure AI Vision – надає широкий спектр можливостей, зокрема Custom Vision.
4. OpenCV (GoCV) – підходить для більш гнучкого та контрольованого підходу, що потребує глибоких знань у галузі комп'ютерного зору.

Для аналізу якості 3D-моделей та здійснення прогнозів:

1. Google Cloud Platform AI (Vertex AI) – платформа для навчання та розгортання моделей машинного навчання.
2. Amazon SageMaker – аналогічна платформа від Amazon.
3. Microsoft Azure Machine Learning – надає інструменти для навчання та розгортання моделей.
4. Бібліотека GoLearn (github.com/sjwhitworth/golearn) – підходить для реалізації простіших моделей машинного навчання безпосередньо в Go.

Для завдань обробки природної мови (NLP):

1. OpenAI API (через HTTP-запити з Go) – для генерації описів або поліпшення інтерфейсу користувача.
2. Google Cloud Natural Language API – для аналізу тексту та отримання інформації.
3. Microsoft Azure Cognitive Service for Language (Azure SDK for Go) – аналогічні можливості Microsoft.

Хоча інтеграція штучного інтелекту в додатки та в процеси 3D-моделювання й адитивного виробництва для створення високоякісних тактильних моделей має безліч переваг, однак супроводжується і низкою проблем, оскільки ШІ не є досконалою технологією і його необхідно постійно навчати на даних та вдосконалювати моделі. У штучному інтелекті часто трапляється явище галюцинації (так званої «штучної галюцинації»). Галюцинації ШІ – це помилки алгоритмів машинного навчання, коли модель інтерпретує дані неправильно, «бачить» неіснуючі елементи чи спотворює результати, тобто впевнена реакція штучного інтелекту, яка не підтверджується даними його навчання або є вигаданою та не має стосунку до дійсності [103, 104]. У цьому контексті під час формування тактильних 3D-моделей із шрифтом Брайля та іншого аналізу із застосуванням комп'ютерного зору, нейронних мереж, Deep Learning (глибокого навчання), нейромережевих методів роботи, оптимізаційних методів та алгоритмів, можливе хибне трактування ШІ: модель може сплутати рельєфні крапки Брайля з дефектами поверхні. Також може виникати помилка у визначенні розмірів та розташування крапок Брайля – при автоматизованому скануванні можливі спотворення розмірів або позицій рельєфних знаків (наприклад, коли на 3D-моделі реальна висота крапки становить 0.3 мм, а штучний інтелект помилково вказує 3 см. Окрім цього, можлива низька якість реконструкції: алгоритми можуть додавати зайві елементи або згладжувати важливі рельєфні деталі, що критично для читання шрифту Брайля. Але для запобігання галюцинаціям і підвищення рівня адекватності моделей штучного інтелекту – доцільно використовувати спеціалізовані датасети – навчати моделі на високоточних 3D-сканах шрифту Брайля. Також ефективним є застосування комбінованих методів контролю якості: перевірка результатів за допомогою традиційного оптичного та тактильного аналізу, а також коригування алгоритмів із дотриманням метрологічних стандартів, тобто суворих допусків на розміри та розташування елементів.

Враховуючи проблеми штучного інтелекту, зокрема явища галюцинації, інтеграція ШІ усе ж має переваги, по-перше, дозволяє зменшити вплив людського фактора – автоматизована генерація рельєфного шрифту зменшує ризик помилок під час ручного моделювання. По-друге, відбувається автоматизація процесу перевірки – ШІ може миттєво оцінювати якість 3D-моделей, що скорочує час перевірки. Окрім того, підвищується точність 3D-друку, оскільки алгоритми машинного навчання здатні оптимізувати параметри друку для кращої якості. Додатково, ШІ дає змогу адаптуватися до індивідуальних вимог – персоналізовані моделі створюватися швидше та точніше.

Для прикладу, нейромережні плагіни для 3D Braille CAD, Blender, Fusion 360, SolidWorks дають змогу автоматично генерувати текст шрифтом Брайля з точними розмірами. По-друге, інтеграція ШІ-аналізаторів у 3D Braille CAD для 3D-сканування дає змогу здійснювати перевірку відповідності створених моделей стандартам (наприклад, ISO 17351). По-третє, використання машинного (комп'ютерного) зору для друкарських платформ – контроль якості на етапі виробництва. Крім того, можливе сканування зображень у форматах JPG/PNG, розпізнавання моделей із текстом Брайля та перетворення їх на тривимірну модель, готову до 3D-друку. Також доцільне впровадження прогностичного оцінювання якості майбутніх 3D-моделей з урахуванням різноманітних чинників (типу 3D-друку, матеріалів, тексту Брайля тощо) на основі попередньо навчених даних.

Результати роботи штучного інтелекту демонструють значний прогрес у створенні тактильних моделей для незрячих людей: 1) автоматична генерація шрифту Брайля – ШІ успішно перетворює текст на текст шрифтом Брайля на тривимірних моделях, генеруючи точні розміри й розташування крапок для читання; 2) калькулятор прогнозування – за допомогою алгоритмів машинного навчання ШІ прогнозує якість майбутніх 3D-моделей, враховуючи такі параметри, як тип друку, матеріал і текст Брайля; 3) аналіз якості моделей – ШІ може автоматично оцінювати 3D-моделі на відповідність встановленим стандартам,

включаючи точність розмірів крапок Брайля і їх розташування; 3) конвертація зображень – ШІ автоматично перетворює зображення (JPG/PNG) на 3D-моделі зі шрифтом Брайля, готові до друку у форматі STL.

Демонстрація роботи алгоритмів: 1) OpenAI GPT – генерація тексту Брайля та аналіз параметрів друку; 2) OpenCV – визначення контурів 3D-моделі тексту Брайля на зображеннях і їх конвертація у 3D-моделі; 3) Amazon Rekognition – розпізнавання тексту на зображеннях із точністю до символів.

Наприклад, аналізуючи текст та перетворюючи його на шрифт Брайля, штучний інтелект згенерував такий результат:

Текст користувача: "Поліграфія"

Шрифт Брайля, згенерований ШІ OpenAI ChatGPT: ⠠ ⠠ ⠠ ⠠ ⠠ ⠠ ⠠ ⠠ ⠠ ⠠

ChatGPT (модель GPT 4.1-4.5, o4-mini) генерує модель за описом користувача (наприклад: 3D-модель у формі циліндра розміром 10x10 см, текст шрифтом Брайля – «Поліграфія», розміри крапок за замовчуванням: 3D-модель із точними розмірами крапок (визначеною висотою і діаметром) завантажує файл у форматі STL (рис 5.6.1).

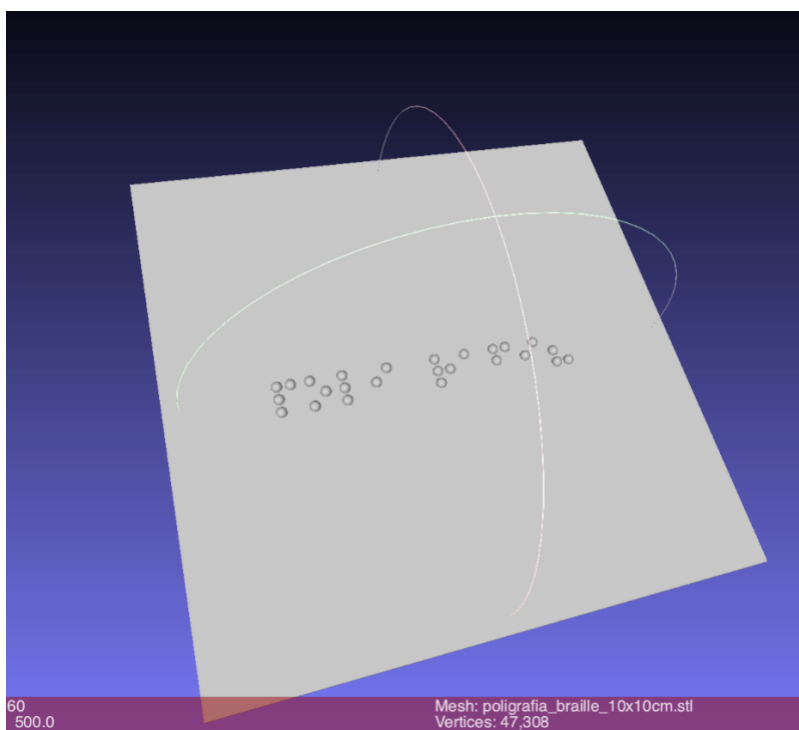


Рис. 5.6.1. Згенерована 3D-модель штучним інтелектом Open AI ChatGPT model GPT 4o

Щодо інших можливостей, таких як сканування моделей із зображень (OpenCV, Amazon Rekognition), оцінювання якості майбутньої 3D-моделі (ChatGPT), необхідно й надалі навчати моделі штучного інтелекту на різноманітних даних для підвищення якості інформації та обробки даних.

Інтеграція штучного інтелекту в додаток забезпечує не лише автоматизацію процесів моделювання, а й суттєве зменшення людського фактора в оцінці якості та точності моделі, що є інноваційним у тактильному виробництві.

Підсумовуючи результати, інтеграція ШІ у додаток для створення тактильних 3D-моделей надає значні переваги, особливо в галузі розпізнавання шрифту Брайля та аналізу якості моделей. ШІ може ефективно використовуватися у процесах 3D-моделювання та адитивного виробництва шрифту Брайля. Основні завдання – мінімізація помилок, автоматизація контролю якості та оптимізація рельєфу для зручності читання. Однак, ця технологія потребує точних еталонних даних і суворих метрологічних алгоритмів, щоб уникнути галюцинацій і неточностей.

Вибір конкретних AI-сервісів залежить від вимог до точності, масштабованості, вартості та доступних ресурсів розробки. Для програмного забезпечення написаного мовою Golang, можна використовувати такі сервіси, як Amazon Rekognition, Google Cloud Vision API та Microsoft Azure AI Vision для розпізнавання шрифту Брайля, а також платформи Google Cloud AI Platform, AWS SageMaker та Microsoft Azure Machine Learning для аналізу якості та прогнозування. OpenCV є потужним інструментом реалізації власних алгоритмів, проте потребує глибших технічних знань. Спираючись на функціонал додатка «3D Braille CAD», нашим вибором буде використання сервісів штучного інтелекту Microsoft Azure, OpenCV та Google Cloud AI Platform. Загалом інтеграція штучного інтелекту в процес контролю якості 3D-моделей Брайля має великий потенціал для революції в тактильному виробництві та сприяє розвитку адитивного виробництва у більш інклюзивному та інноваційному напрямку [90].

Висновки до розділу 5

1. Описано алгоритми та функціональні можливості додатка «3D Braille CAD», який забезпечує аналіз тривимірних моделей тексту Брайля на відповідність стандартам, а також прогнозування якості 3D-моделей і генерацію тексту в шрифт Брайля.
2. Обґрунтовано важливість створення та розвитку програмного забезпечення для формування тривимірних моделей Брайля, що сприяє покращенню процесів формування шрифту Брайля в технологіях 3D-моделювання.
3. Розкрито детальний принцип роботи можливостей додатка на рівні програмного коду, зокрема описано функції генерації шрифту Брайля та створення 3D-моделей у форматі STL із параметрами за замовчуванням або спеціально заданими користувачем (розмір крапок тощо). Після

- генерації моделі реалізовано запит на оцінку відповідності розмірів крапок Брайля стандартам. Описано принцип конвертації зображень JPG/PNG у 3D-модель у форматі STL та обґрунтовано необхідність оптимізації цієї функції. Проведено аналіз принципу роботи прогностичного калькулятора для оцінки якості майбутньої тактильної моделі з урахуванням різних параметрів (текст, параметри, тип 3D-друку).
4. Обґрунтовано доцільність інтеграції штучного інтелекту в програмне забезпечення «3D Braille CAD». Наведено прототипи коду з інтеграціями у функціях генерації шрифту Брайля, створення 3D-моделей, аналізу відповідності стандартам, конвертації зображень у 3D-моделі та прогнозування якості майбутніх тактильних моделей. Проаналізовано можливості різних сервісів штучного інтелекту, визначено їхні переваги та недоліки при використанні в додатку «3D Braille CAD».

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технологій 3D-моделювання та принципів створення тривимірних моделей, а також технологій адитивного виробництва. Розглянуто проблематику застосування інформаційних технологій для формування текстів різної складності шрифтом Брайля для незрячих користувачів. Описано основні технології створення шрифту Брайля, їх переваги та недоліки, зокрема у використанні в навчальному процесі.
2. Проаналізовано основні критерії, за якими визначають незрячість, використання ключових технологій для створення інклюзивного середовища. Розглянуто вимоги до формування шрифту Брайля в умовах адитивного виробництва (зокрема розміри, висоту та діаметр крапок).
3. Визначено фактори впливу на якість формування шрифту – від створення цифрової 3D-моделі до друку на 3D-принтері та постдрукарських процесів. Проаналізовано етапи виробництва з використанням різних технологій 3D-друку (FDM/FFF, SLA/DLP, PolyJet, SLS), вплив матеріалів для 3D-друку, програмного забезпечення для тривимірного моделювання, а також досліджено роботу 3D-принтерів. Наведено множину основних факторів, що мають значення для формування шрифту Брайля: висота крапки, пробіл між крапками, діаметр крапки, висота шару, роздільна здатність, точність.
4. Здійснено формалізоване представлення взаємозв'язків між факторами, що впливають на формування шрифту Брайля, за допомогою розробленої семантичної мережі – аналога орієнтованого графа, у вершинах якого відтворено основні чинники процесу, а дуги передають лінгвістичну суть зв'язків між ними.
5. Розроблено базову багаторівневу модель факторів, що впливають на якість формування шрифту Брайля, за методом математичного моделювання ієрархій. Синтезовано удосконалену багаторівневу модель факторів

формування шрифту Брайля на основі методу ранжування та методу визначення вагомості предикатів. Ітераційний процес побудови моделі передбачає: отримання варіанта на основі кількості впливів (із вагою $1w = 10$) та залежностей (із вагою $2w = -10$) між факторами в семантичній мережі; коригування результату з урахуванням вагових коефіцієнтів предикатів, які відображають посилення чи послаблення зв'язків між факторами.

6. Виконано оптимізацію вагових значень факторів на основі матриці попарних порівнянь, побудованої за шкалою відносної важливості об'єктів з урахуванням моделі, отриманої на попередньому етапі. Опрацювання матриці дозволило отримати оптимальні вагові значення факторів за критеріями: 1) для процесів-факторів адитивного виробництва $\lambda_{max} = 8.275$; індекс узгодженості $SC = 0.455$; відношення узгодженості $CR = 0.367$. Оскільки індекс узгодженості не відповідає індексу випадковості, було прийнято рішення про звуження критеріїв і застосування методу Ело, реалізованого мовою Python для зручності розрахунків 2) для формування шрифту Брайля в умовах адитивного виробництва $\lambda_{max} = 6.33$; індекс узгодженості $SC = 0.66$; відношення узгодженості $CR = 0.053$. На основі отриманих значень синтезовано оптимізовану модель пріоритетного впливу факторів на процеси та формування шрифту Брайля.
7. Розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології оцінювання пріоритетних факторів, що впливають на якість формування шрифту Брайля в різних технологіях 3D-друку. Модель включає інформаційну базу вихідних даних, методи та моделі оцінювання пріоритетних факторів для забезпечення якісного формування шрифту Брайля в технологіях 3D-моделювання, а також нечітку систему прогностичного оцінювання пріоритетних процесів для створення якісного формування шрифту Брайля для незрячих користувачів.

8. Проведено експериментальні дослідження формування шрифту Брайля на різних поверхнях (матеріалах) за допомогою 3D-принтера за технологією FDM, а також виконано розрахунки вартості створення тактильних моделей із порівнянням 3D-друку з традиційними методами виробництва.
9. Описано алгоритми роботи програмного забезпечення «3D Braille CAD» для 3D-моделювання брайлівських моделей із реалізованими функціями: генерування тексту Брайля; створення тривимірної моделі з текстом Брайля у форматі файлу .STL – з параметрами за замовчуванням або з налаштуваннями користувача; аналіз 3D-моделі з текстом Брайля у форматі STL на відповідність стандартам розмірів крапок шрифту Брайля; конвертація зображень у тривимірну модель з подальшим перетворенням на формат STL із перспективою вдосконалення функціоналу та інтеграції штучного інтелекту; реалізація калькулятора прогнозування якості майбутньої тривимірної брайлівської моделі з урахуванням заданих параметрів і вибору технології 3D-друку.
10. Реалізовано алгоритми, наведено програмний код та ілюстровані приклади консольної програми, яка написана мовою Golang, для оптимізації процесів виробництва та швидкого і якісного створення брайлівських моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Introduction to 3D Modeling and Representation. *Encyclopedia Britannica*.
2. Smith J. Algorithmic 3D Modeling Techniques. *Journal of Graphics Design*.
3. White R. Scanning Technologies in 3D Modeling. *Tech Innovations*.
4. Texture Mapping Basics. *3D Graphics Tutorials*.
5. Black D. 3D Rendering and Modeling Processes, *Advances in Computer Graphics*.
6. Brown K. Specialized Software for 3D Creation. *Creative Technology Today*.
7. Green L. Physical Phenomena in Computer Modeling. *Digital Modeling Magazine*.
8. Lee M. Digital Sculpting in Creative Industries. *Art & Design Journal*.
9. Overview of ZBrush and Sculpting Tools. *SculptTech Blog*.
10. Roberts S. Polygonal Modeling Techniques. *Modeling Insights*.
11. Clark T. Curve Modeling in 3D Graphics. *NURBS Handbook*.
12. Wireframe Models in 3D Design. *TechNet Reviews*.
13. Baker C. Surface Models and Their Applications. *CAD Today*.
14. Patel A. Solid Models for 3D Printing. *Engineering Weekly*.
15. Software for 3D Modeling: Blender, Maya, SolidWorks. *3D World*.
16. Davis J. Photogrammetry in 3D Modeling. *Photography and Modeling Tech*.
17. Edwards P. 3D Technology in Gaming and Film. *TechFuture Insights*.
18. Carter H. 3D Printing and CNC Applications. *Industrial Design Journal*.
19. Wikipedia topic 3D-modeling, section 3D-modeling Software, compression with 2D methods, 3D-model market. *Uses*.
20. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2015.
21. Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. Singapore: World Scientific Publishing, 2010.

22. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: A critical review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. № 83 (1–4). P. 389–405.
23. Wohlers T. Wohlers Report 2019: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Warrendale: Wohlers Associates, 2019.
24. Campbell T., Williams C., Ivanova O., Garrett B. Could 3D Printing Change the World? *Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing*. Washington, DC: Atlantic Council, 2011.
25. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D-printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018. № 143. P. 172–196.
26. ASTM International. *Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology*. ASTM F2792-12a, 2012.
27. World Health Organization. *World Report on Vision*. Geneva: WHO, 2021.
28. American Foundation for the Blind. *Visual Impairment Statistics in the United States*. Washington, DC: AFB, 2019.
29. Bremer J., et al. Standards and Classification of Visual Impairment. *Journal of Visual Impairment & Blindness*. 2018. № 112 (5). P. 341–348.
30. Liu Y., Smith K., et al. Tactile Sensitivity and Braille Reading Performance in Visually Impaired Individuals. *IEEE Transactions on Haptics*. 2020. № 13 (2). P. 200–208.
31. Hawkins P. Advances in Braille Production: Processes and Materials Optimization. *Assistive Technology Journal*. 2019. № 14 (3). P. 215–223.
32. Hersh M.A. Emerging Assistive Technologies for the Visually Impaired. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. 2018. № 13 (6). P. 545–553.
33. Smith A., Johnson R. Artificial Intelligence in Accessibility: Improving Life for Visually Impaired Persons. *Journal of Assistive AI Technologies*. 2020. № 2 (1). P. 30–45.

34. Perry B., Evans D. Environmental Inclusion and Tactile Perception in Blind Individuals. *Journal of Disability Studies*. 2021. № 27 (4). P. 350–366.
35. Zhang Y., Li M., Wang H. Artificial Intelligence in Additive Manufacturing: Opportunities and Challenges. *J. Manuf. Syst.* 2020. № 54. P. 1–12.
36. Kumar A., Gupta B. Machine Learning Approaches for 3D Modeling. *IEEE Access*. 2019. № 7. P. 32456–32464.
37. Li H., Zhao R., Chen L. Integrating AI in Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Addit. Manuf.* 2021. № 36. P. 101–110.
38. Smith J. Deep Learning Applications in Image Processing for 3D Modeling. *Comput. Vis. J.* 2020. № 11. P. 45–53.
39. Chen R. Evolutionary Algorithms in 3D Design Optimization. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2019. № 102. P. 789–798.
40. Patel S., Kumar M. Decision Support Systems in Modern Manufacturing Processes. *J. Intell. Manuf.* 2021. № 32. P. 89–99.
41. Hernandez P., Lee S., Kim J. Computer Vision Techniques for Automated 3D Model Reconstruction. *IEEE Trans. Image Process.* 2019. № 28. P. 1234–1243.
42. Lee D. Robotics in Additive Manufacturing: Automation and Beyond. *Robotics Comput.-Integr. Manuf.* 2021. № 67. P. 102–111.
43. Wang L. AI Optimization in Additive Manufacturing Processes. *Proc. CIRP*. 2020. № 93. P. 145–150.
44. Davis M. Quality Enhancement in 3D Printing Using AI Algorithms. *Rapid Prototyp. J.* 2021. № 27. P. 123–132.
45. Martin G. Systematic Integration of AI in Manufacturing: A Strategic Approach. *J. Manuf. Technol.* 2020. № 46. P. 211–220.
46. O’Neil K. Automation and Performance in AI-driven 3D Modeling. *J. Autom. Comput.* 2021. № 15. P. 77–85.
47. Rogers T. Advances in 3D Modeling Technologies for Braille Applications. *J. Assist. Technol.* 2021. № 16. P. 33–41.

48. Ahmed F. Comparative Analysis of AI and Traditional 3D Modeling Techniques. *Int. J. Adv. Manuf.* 2020. № 38. P. 567–575.
49. Kim S. Optimizing 3D Braille Model Creation Using AI-based Tools. *J. Educ. Technol. Soc.* 2022. № 25. P. 98–106.
50. Johnson P., Smith A. Braille: A Tactile Writing System for the Visually Impaired. London: Routledge, 2018.
51. Davis J., Miller S. Inclusive Education and Assistive Technologies: Enhancing Braille Accessibility. New York: Springer, 2019.
52. Brown G., Wilson T. Advances in Braille Production Methods. *International Journal of Assistive Technology*. 2018. № 12 (4). P. 345–360.
53. Anderson L., Carter M. Traditional Techniques in Braille Embossing. *Journal of Print Technology*. 2020. 15 (2). P. 120–130.
54. Evans R., Patel N. 3D Printing Applications in Assistive Technology. *Rapid Prototyping Journal*. 2021. 27 (1). P. 45–55.
55. Mitchell K., Roberts J. Modern Computerized Solutions for Braille Communication. *Assistive Technology*. 2019. № 23 (3). P. 200–210.
56. Thompson H., Garcia L. Comparative Analysis of Braille Formation Methods. *Journal of Sensory Studies*. 2020. № 16 (5). P. 310–322.
57. Walker D., Kim S. Additive Manufacturing in Assistive Device Production. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. № 37 (6). P. 900–910.
58. Baker T., Harris R. 3D Modeling and Printing for Custom Braille Solutions. *Computer-Aided Design*. 2021. № 42 (8). P. 780–790.
59. Reed M., Scott P. Universal Design and the Future of Braille Technology. *Journal of Assistive Design*. 2020. № 14 (4). P. 400–415.
60. Miller A., Thompson B. Advances in 3D Modeling for Tactile Applications. *Journal of Assistive Technologies*. 2019. № 15 (2). P. 120–130.

61. Johnson C., Williams D. Challenges in CAD Systems for Tactile Prototyping. *International Journal of Computer-Aided Design*. 2018. № 22. P. 95–107.
62. Smith J., Lee K. Client-Server Architectures in Modern CAD Systems. *Computer-Aided Engineering Journal*. 2020. № 18. P. 45–53.
63. Davis R., Allen P. Selection Criteria for CAD Systems in Braille Production. *Journal of Visual Impairment & Accessibility*. 2019. № 10. P. 67–75.
64. Walker D., Kim S. Software Analysis for 3D Tactile Modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2020. № 26. P. 80–88.
65. Martinez L., Patel R. Fuzzy Logic and Adaptive Methods in Tactile Text Generation. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2021. № 29 (3). P. 550–560.
66. O’Neil P., Garcia M. Mathematical Modeling for Precise Braille Dot Placement. *Journal of Computational Design*. 2020. № 17. P. 140–148.
67. Brown G., Wilson T. 3D Printing for Tactile Models: Parameters and Process Analysis. *Rapid Prototyping Journal*. 2020. № 27 (1). P. 45–55.
68. Miller A., Thompson B. Standardization of Braille Dot Parameters in Tactile Production. *International Journal of Accessible Design*. 2018. № 10 (3). P. 67–74.
69. Davis R., Allen P. Comparative Study of 3D Printing Technologies for Fine Detail Reproduction. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. 21 (4). P. 310–322.
70. Lee H., Anderson M. Mathematical Modeling and Accuracy in 3D Printed Braille. *Computer-Aided Design*. 2021. № 42 (8). P. 780–790.
71. Roberts T., Kim J. Post-Processing Techniques in 3D Printing for Enhanced Tactile Quality. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. № 29(5). P. 215–225.
72. Evans R., Singh A. Advantages and Limitations of Additive Manufacturing in Tactile Model Production. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. № 37 (6). P. 900–910.
73. Walker D., Reed M. Additive Manufacturing vs. Traditional Methods in the Production of Braille Models. *Journal of Digital Fabrication*. 2020. № 18 (3). P. 134–142.

74. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2015.
75. Chua C.K., Leong K.F. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications. Singapore: World Scientific, 2014.
76. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive Manufacturing Methods and Modelling Approaches: A Critical Review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. № 83 (1–4). P. 389–405.
77. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018. № 143. P. 172–196.
78. O’Neil P., Garcia M. Precision and Control in 3D Printing: The Role of Stepper Motors and Microstepping. *Journal of Manufacturing Science.* 2020. № 38 (4). P. 350–360.
79. Mitchell K., Roberts J. Belt Drive Systems in 3D Printing: Design and Performance Analysis. *Int. J. Mech. Eng.* 2021. № 29 (2). P. 215–223.
80. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2015.
81. Chua C.K., Leong K.F. *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications*. Singapore: World Scientific, 2014.
82. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018. № 143. P. 172–196.
83. Davis R., Allen P. Material Properties and Their Impact on 3D Printed Tactile Models. *J. Mater. Process. Technol.* 2020. 29 (5). P. 215–225.
84. Berman B. 3-D Printing: The New Industrial Revolution. *Business Horizons.* 2012. 55 (2). P. 155–162.

85. Campbell T., Williams C., Ivanova O., Garrett B. Could 3D Printing Change the World? Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing. Atlantic Council, 2011.
86. Сеньківський В. М., Піх І. В., Кудряшова А. В., Литовченко О. В. Теоретичні основи забезпечення якості видавничо-поліграфічних процесів. *Поліграфія і видавнича справа*. 2016. № 1 (71). С. 20–29.
87. Матвеев В. Семантичні мережі. URL: matveev.kiev/exprt/t5.pdf.
88. Durnyak B., Pikh I., Senkivsky V. Method of determining the weight of predicates of semantic networks in publishing processes. *Przegląd papierniczy (Polish Paper Review)*. Warszawa, 2018. Vol. 1. P. 57–60. (Scopus).
89. Tarasov N., Khamula O. Factors influencing the creation of Braille 3d models in additive manufacturing. *1-st International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems (ICyberPhyS-2024)*. Khmelnytskyi, Ukraine, June 28, 2024. CEUR Workshop Proceedings. P. 129–141.
URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85200694226&origin=recordpage>.
90. Tarasov N., Khamula O. Quality control of 3D Braille Models in additive manufacturing using artificial intelligence technology. *Квалілогія книги*. 2024. № 1 (45). С. 58–66.
91. Tarasov N., Khamula O. Integrating artificial intelligence into 3d modeling software for optimized additive manufacturing. *VII International scientific and practical conference «Globalization of scientific knowledge: international cooperation and integration of sciences»* (10.05.2024; Vinnytsia, Ukraine – Vienna, Austria). № 39. P. 348–352.
92. Tarasov N., Khamula O., Soroka N. Analysis of 3d-printing technologies and their impact on additive manufacturing processes. *Наукові записки УАД*. 2024. Vol. 1. №. 68. P. 198–206.
93. Tarasov N.A., Khamula O.G. Influence of additive technologies and selection of

- materials on the quality of 3D printed braille models. *Поліграфія і видавнича справа*. 2023. Vol. 2. № 86. P. 135–142.
94. Піх І. В. Методологічні основи інформаційних технологій формування та прогностичного оцінювання якості книжкових видань: автореф. дисертація д-ра техн. наук: 05.13.06 / Укр. акад. друкарства. Львів, 2018.
 95. Лямець В. І., Тевяшев В. І. Системний аналіз: вступний курс. 2-е вид., переробл. та допов. Харків: ХНУРЕ 2004. 448 с.
 96. Дурняк Б.В., Піх І.В., Сеньківський В.М. Теоретичні основи інформаційної концепції формування та оцінювання якості видавничо-поліграфічних процесів: монографія. Львів: Українська академія друкарства, 2022. 356 с.
 97. Сеньківський В. М., Піх І. В. Математичне моделювання процесу ранжування факторів. *Моделювання та інформаційні технології*. Київ: ІПМЕ НАНУ, 2013. № 69. С. 142–146.
 98. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 41832. Україна. Імітаційне моделювання в системному аналізі методом бінарних порівнянь [Комп'ютерна програма]: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 41832 від 17.01.2012. Зареєстр. в Україні. Авторські майнові права належать І. В. Гілеті, В. М. Сньківському, О. В. Мельникову.
 99. Піх І. В., Кудряшова А. В. Багатофакторний вибір альтернативних варіантів композиційного оформлення видання на основі лінійного згортання критеріїв. *Наукові записки*. 2017. № 2 (55). С. 41–46.
 100. Хамула О. Г., Васюта С. П., Яців М. Р. Оптимізація математичної моделі ієрархії критеріїв якості сприйняття інформації в електронних виданнях дітьми з вадами зор. *Технологія і техніка друкарства*. 2014. № 4. С. 14-20.
 101. Сеньківський В. М., Піх І. В., Голубник Т. С. Нечітка база знань та нечіткі логічні рівняння у процесі реалізації монтажних спусків. *Наукові записки*. Львів: Укр. акад. друкарства, 2014. № 3 (48). С. 111–119.

102. Metz C., Schmidt G. Elon Musk and Others Call for Pause on A.I., Citing ‘Profound Risks to Society. *The New York Times*. URL: <https://www.nytimes.com/2023/03/29/technology/ai-artificial-intelligence-musk-risks.html>
103. Vallance C. Elon Musk among experts urging a halt to AI training. *BBC*. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-65110030>
104. Ілюхін В. С. Застосування технологій створення та редагування відео у сучасних системах комп’ютерної графіки: пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні, спеціальність 122 – Комп’ютерні науки. Харків, 2021. 74 с.
105. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 1980.
106. Saaty T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.

ДОДАТКИ

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті в наукових виданнях, включених до наукометричної бази Scopus:

1. Tymchenko O., Khamula O., Vasiuta S., Tarasov N., Sosnovska O. Identification of Factors Influencing the Design Processes in Startups. *Proceedings of the 4rd International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security*. Khmelnytsky, Ukraine. March 23–24, 2023. CEUR Workshop Proceedings, 2023. P. 271–281. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85154064361&origin=recordpage>.

2. Tarasov N., Khamula O. Factors influencing the creation of Braille 3d models in additive manufacturing. *1-st International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems (ICyberPhyS-2024)*. Khmelnytskyi, Ukraine, June 28, 2024. CEUR Workshop Proceedings, 2024. P. 129–141. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85200694226&origin=recordpage>.

Статті в іноземних закордонних виданнях

3. Tarasov N., Khamula O. Integrating artificial intelligence into additive manufacturing for the development of braille models. *VI International Scientific and Practical Conference «scientific trends and trends in the context of globalization»*. April 19–20. Umeå, Sweden, 2024. Vol. 44, №. 197. P. 528–535.

4. Tarasov N., Khamula O. Prospects for integrating ai into inclusion for people with visual impairments. *VIII International Scientific and Practical Conference «International scientific discussion: problems, tasks and prospects»*. May, 19–20. Brighton, United Kingdom, 2024. Vol. 45, № 201. P. 580–588.

5. Tarasov. N., Khamula O. Predictive mathematical modeling to enhance additive manufacturing processes. *VI International scientific and practical conference*

«Grundlagen der modernen wissenschaftlichen forschung». Mai, 2024. Zürich–Vinnytsia: Boleswa Publishers & Ukrlogos Group LLC, 2024. P. 199–206.

6. Tarasov N., Khamula O. Integrating artificial intelligence into 3d modeling software for optimized additive manufacturing. *VII International scientific and practical conference «Globalization of scientific knowledge: international cooperation and integration of sciences»* (10.05.2024; Vinnytsia, Ukraine – Vienna, Austria). № 39. P. 348–352.

Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних (Index Copernicus)

7. Tarasov N.A., Khamula O.G. Influence of additive technologies and selection of materials on the quality of 3D printed braille models. *Поліграфія і видавнича справа*. 2023. Vol. 2, № 86. P. 135–142.

8. Tarasov N.A., Khamula O.G. Optimizing 3D printing parameters and additive manufacturing techniques for braille production: a comparative analysis. *Наукові записки УАД*. 2023. Vol. 2, №. 67. P. 187–196.

9. Tarasov N., Khamula O., Soroka N. Analysis of 3d-printing technologies and their impact on additive manufacturing processes. *Наукові записки УАД*. 2024. Vol. 1, №. 68. P. 198–206.

10. Tarasov N., Khamula O., Soroka N. Analysis of 3d modeling software in additive manufacturing for creating braille models. *Комп'ютерні технології друкарства*. 2024. Vol. 1, №. 51. СТОПІНКИ!!!

11. Tarasov N., Khamula O., Soroka N. Analysis of factors of 3d printers for the creation of 3d models of braille. *Поліграфія та видавнича справа*. 2024. Vol. 1, № 87. P. 115-124.

Статті у фахових наукових виданнях України:

11. Tarasov N., Khamula O. Quality control of 3d braille models in additive manufacturing using artificial intelligence technology. *Квалілогія книги*. 2024. № 1 (45). С. 58–66.

12.

Тези доповідей

13. Тарасов Н.А., Хамула О.Г. Порівняльний аналіз інформаційних технологій 3D-моделювання. *Тези доповідей наук.-техн конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* (Львів, 7–11 лютого 2022 року). Львів: УАД. 2022. С. 70.

14. Тарасов Н. А., Хамула О. Г., Васюта С. П. Інформаційні технології 3d моделювання. *VII Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (PMW-2022)* (Харків, 17–21 травня 2022 року). Харків: ХНУРЕ, 2022. Т. I. С. 115.

15. Тарасов Н. А., Хамула О. Г. Аналіз використання адитивних технологій. *Тези доповідей наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів* (Львів, 6–10 лютого 2023 р.). Львів: УАД, 2023. С.70.

16. Тарасов Н. А., Хамула О. Г. Аналіз матеріалів для 3d-друку. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: тези доп. VIII Міжнар. наук.-техн. конф.* (Харків, 16–20 травня 2023 року). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2023. Т. 1. С. 56–57.

17. Tarasov N.A., Khamula O.G. Using of artificial intelligence in 3d printing technologies. *VI International scientific and practical conference «Modern research in science and education»* (8–10 February, 2024). Chicago, USA. P. 125–130.

18. Тарасов Н. А., Хамула О. Г. Технології адитивного виробництва в інклюзії (для людей з вадами зору). *Тези доповідей наук.-техн конференції професорсько-*

викладацького складу, наукових працівників і аспірантів (Львів, 5–9 лютого 2024 року). Львів: УАД, 2024. С. 209.

19. Tarasov N., Khamula O. Prospects for the development of additive manufacturing. IX Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (PMW-2024) (Харків, 14–17 травня 2024 року). Харків: ХНУРЕ, 2024. Т. I. С. 30–33.

Додаток Б.**ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

Основні результати дисертації були представлені та обговорені на:

- звітних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів Української академії друкарства (Львів, 2021–2024);
- VII Міжнародній науково-практичній конференції «Поліграфічні, мультимедійні та WEB-технології» (Харків, 2024/2022/2023 Харків, 2022, 2023, 2024);
- 1st International Workshop on Intelligent & CyberPhysical Systems (ICyberPhyS-2024), CEUR Workshop Proceedings (Хмельницький, 2024).

Додаток В.

РОЗРАХУНКИ ТА ФУНКЦІЇ ТЕРМІВ І ЇХ ЗНАЧЕНЬ В ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ ТАКТИЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Таблиця 4.2.1

Зміна	Тип лінгвістичної змінної	Назва та UM універсальне значення	LT лінгвістичні терми
г ₁	Розміри крапок тексту шрифтом Брайля	1. Висота крапки=[0.1–1.0]мм 2. Діаметр крапки=[0.8–2.0]мм 3. Форма крапки=[raised, flat, recessed] 4. Розташування крапок=[0.0–2.5]мм 5. Пробіл між крапками=[0.5–2.5]мм 6. Пробіл між осередками Брайля=[2.0–5.0]мм 7. Гострота границь крапки=[0–1] 8. Стійкість крапки до тиску=[0–1] 9. Розрізнення крапки в рядку=[0–1] 10. Взаємодія крапок із поверхнею=[0–1] 11. Склад матеріалу крапки=[жорсткий, еластичний, гладкий]	1. низька, середня, висока 2. маленький, середній, великий 3. випукла, плоска, втоплена 4. вузьке, оптимальне широке 5. маленький, оптимальний, великий 6. вузький, середній, широкий 7. низька, середня, висока 8. м'яка, середня, жорстка 9. погана, середня, хороша 10. низька, середня, висока 11. жорсткий, еластичний, гладкий

r3	Постдрукарські процеси	1. Зняття підтримки=[1–10] хв 2. Очищення моделі=[1–15]хв 3. Фінальне затвердіння=[5–60]хв 4. Шліфування[0–100]% покриття	1. швидке (1–3хв), середнє (4–7хв), довге (8–10хв) 2. легка (1–5хв), середня (6–10хв), ретельна (11–15хв) 3.коротке (5–15хв), середнє (16–30хв), довге (31–60хв) 4. невелика(0–30%), середня(31–70%), повна(71–100%)
d2	Розмір клітинок та сітки Брайля	1. Розмір клітинок із 6 крапок=[2.0-4.5]мм 2. Розмір сітки – 2,3 мм х 2,3 мм	1. маленький (2.0–3.0 мм), середній(3.1–4.0 мм), великий (4.1–4.5 мм) 2. вузький (10–50 мм), середній (51–100 мм), широкий (101+ мм)
d3	Тип шрифту	1. Braille-3D Font, Braille Embossing Font, Braille Standard Font	1. Braille-3D Font, Braille Embossing Font, Braille Standard Font

Таблиця 4.2.2

Терм-множини лінгвістичних значень для оцінювання критерію SLA-DLP

3D-друку

Зміна	Тип лінгвістичної змінної	Назва та УМ універсальне значення	LT лінгвістичні терми
q1	Параметри слайсера	1. Товщина шару [0.01–0.2]мм.	1. ультратонкий, тонкий, товстий

		2. Час експозиції=[1–15] с 3. Інтервали між шарами=[0.1–5] с 4. Швидкість підйому платформи=[1,20]мм/с 5. Товщина дренажу смоли=[0.1–1]мм 6.	2. короткий, середній, довгий 3. короткий, середній, довгий 4. горизонтальний, оптимальний, вертикальний
q ₂	Параметри 3D-принтера	1. Потужність LED джерела світла=[10–500] мВт/см ² 2. Температура смоли=[20–40]°C 3. Підняття платформи=[100–200]мм 4. Калібрування платформи=автоматична/ручна	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. маленька, середня, велике 4. автоматичне, напівавтоматичне, ручна
r ₂	Фізико-механічні властивості	1. Модуль гнучкості 2. Удароміцність 3. Коефіцієнт тертя	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока
d ₁	Матеріал 3D-моделі	1. Стандартні смоли: 1) Міцність=[75–85] D; 2) Швидкість затвердіння=[1–15] с 3) Прозорість=[30-0]%	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока

		2. Еластичні смоли: 1) Міцність=[40–70]А 2) Розтяжність=[200-300]% 3) 3) Довговічність=[5– 10] років 3. Біосумісні смоли: 1)Міцність=[70–80]D 2) Клас біосумісності= ISO 10993 4. Екологічність – низький рівень 5. Швидкість друку 10–30 мм/г 6. Точність друку – від 0.01 до 0.05 мм 7. Довговічність – менш довговічний	4. низька, середня, висока 5. низька, середня, висока 6. низька, середня, висока
--	--	--	---

Таблиця 4.3.1

Терм-множини лінгвістичних значень для критерію FDM-FFF 3D-друку

Зміна	Тип лінгвістичної змінної	Назва та UM універсальне значення	ЛТ лінгвістичні терми
q ₁	Параметри слайсера	1. Товщина шару – 0.8-0.15 мм 2. Товщина заповнення та стінок: 15-25% або (0.8–2мм) 3. Температура екструдера – PLA – 190–210°C; ABS – 230–250°C.	1. ультратонкий, тонкий, товстий 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока 4. низька, середня

		4. Температура сопла та стола в реальному часі – для PLA – 180–220°C та стіл 20–60°C; для ABS – 220–250°C та стіл 80–110°C	
q ₂	Параметри 3D-принтера	1. Калібрування столу: допустима похибка $\pm 0,1$ мм, $\pm 0,05$ мм або менше для високої точності тексту Брайля; оптимальна відстань між соплом і поверхнею друку під час формування першого шару – приблизно 0.1–0.2 мм. 2. Швидкість подачі ниткоподібного матеріалу (пластику) – 40–100 мм/с; діапазон регулювання ± 10–20% під час друку; коефіцієнт екструзії – 1.0, з можливістю корекції невеликими кроками ± 0.05 у разі надмірного або недостатнього видавлювання нитки 3. Калібрування осей – для ідеальної точності ± 0.01 мм по	1. низька, середня, висока 2. висока, середня, низька 3. точна, середня, груба

		кожній осі (X, Y, Z); Ввісь X/Y: ~80–100 кроків на мм (залежно від принтера); вісь Z: зазвичай 400–800 кроків на мм для підвищення роздільної здатності	
r ₂	Фізико-механічні властивості	1. Модуль гнучкості 2. Удароміцність 3. Коефіцієнт тертя	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока
d ₁	Матеріал 3D-моделі	1. Довговічність 2. Гнучкість від жорсткого до гнучкого TPU (95A), PLA (85D) 3. Міцність – PLA, ABS, TPU 4. Точність друку —~0.2 мм 5. Швидкість друку – 50–150 мм/с 6. Екологічність	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока 4. низька, середня, висока 5. низька, середня, висока 6. низька, середня, висока

Таблиця 4.2.3

Терм-множини лінгвістичних значень для критерію SLS-технології 3D-друку

Зміна	Тип лінгвістичної змінної	UM універсальне значення	LT лінгвістичні терми
q ₁	Параметри слайсера	1. Товщина шару – 0.08–0.15 мм 2. Товщина заповнення та стінок: мінімальна 0,6, для шрифту Брайля 0.8–1,2 мм	1. ультратонкий, тонкий, товстий 2. низька, середня, висока
q ₂	Параметри 3D-принтера	1. Температура екструдера – не регулюється але є камери: необхідна температура для плавлення порошку(нейлон) 170–190°C) або 60–80°C 2. Швидкість друку (сканування лазера): визначається потужністю лазера, часом експозиції, та висота платформи – 1–5мм/хв. 3. Потужність лазера – 20–100 W 4. Калібрування осі – ±0.05 mm	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. висока, середня, низька 4. точна, середня, груба

r ₂	Фізико-механічні властивості	1. Модуль гнучкості 2. Удароміцність 3. Коефіцієнт тертя	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока
d ₁	Матеріал 3D-моделі	1. Довговічність – високий рівень 2. Гнучкість середня - нейлон PA12 (75–80D); PA11, PA6 3. Міцність – Нейлон PA12 (48–50 МПа); PA11, PA6 4. Точність друку – від 0.1 до 0.2 мм 5. Швидкість друку – 10–20 мм/г 6. Екологічність – середній рівень	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока 4. низька, середня, висока 5. низька, середня, висока 6. низька, середня, висока

Таблиця 4.2.4

Терм-множини лінгвістичних значень для критерію PolyJet 3D-друку

Зміна	Тип лінгвістичної змінної	Назва та УМ універсальне значення	ЛТ лінгвістичні терми
q ₁	Параметри слайсера	1. Товщина шару= [0.016–0.03]мм. 2. Режим струменевої подачі матеріалу	1. ультратонкий, тонкий, товстий 2. низька, середня, висока

		3. Температура камери [20–40°C] 4. Тип смоли 5. Товщина дренажу смоли=[0.1-1]мм	3. низька, середня, висока 4. стандартна, еластична, прозора
q ₂	Параметри 3D-принтера	1. Температура камери [20–40] °C 2. Тиск подачі матеріалу [2–10]бар 3. Тип смоли: прозора, еластична, стандартна 4. Температура подачі матеріалу [20–60] °C 5. Швидкість струменевої подачі матеріалу [0.1–1.0] мл/с 6. Інтенсивність UV- затвердіння	1. ультратонкий, тонкий, товстий 2. низька, середня, висока 3. прозора, еластична, стандартна 4. низька, середня, висока 5. низька, середня, висока 6. низька, середня, висока
r ₂	Фізико-механічні властивості	1. Модуль гнучкості 2. Удароміцність 3. Коефіцієнт тертя	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока
d ₁	Матеріал 3D- моделі	1. Стандартні смоли: 1) Міцність= [75–85] D; 2) Швидкість затвердіння=[1-15] с 3)Прозорість=[30-0]%	1. низька, середня, висока 2. низька, середня, висока 3. низька, середня, висока

		2. Еластичні смоли: 1) Міцність=[40-70]А 2)Розтяжність=[200-300]% 3) 3)Довговічність=[5-10] років 3. Біосумісні смоли: 1)Міцність=[70-80]D 2)Клас біосумісності=ISO 10993 4. Екологічність – низький рівень 5. Швидкість друку - 10-30 мм/г 6. Точність друку – від 0.01 до 0.05 мм	4. низька, середня, висока 5. низька, середня, висока 6. низька, середня, висока
--	--	--	---

1. Параметри слайсера(q₁): SLA-DLP

1. «Товщина шару [0.01–0.2 мм]»

$$K_{\text{ультратонкий}} = 3.003$$

$$\beta_{\text{ультратонкий норм}} = \{1.0, 0.801, 0.601, 0.400, 0.201\}$$

$$K_{\text{тонкий}} = 2.597$$

$$\beta_{\text{тонкий норм}} = \{0.200, 0.600, 1.0, 0.600, 0.200\}$$

$$K_{\text{товстий}} = 3.003$$

$$\beta_{\text{товстий норм}} = \{0.201, 0.400, 0.601, 0.801, 1.0\}$$

2. «Час експозиції [1–15 с]»

$$K_{\text{короткий}} = 3.003$$

$$\beta_{\text{короткий норм}} = \{1.0, 0.801, 0.601, 0.400, 0.201\}$$

$$K_{\text{середній}} = 2.597$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.200, 0.600, 1.0, 0.600, 0.200\}$$

$$K_{\text{товстий}} = 3.003$$

$$\beta_{\text{довгий норм}} = \{0.201, 0.400, 0.601, 0.801, 1.0\}$$

3. «Інтервали між шарами [0.1–5 с]»

$$\beta_{\text{короткий норм}} = \{1.0, 0.801, 0.601, 0.400, 0.201\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.200, 0.600, 1.0, 0.600, 0.200\}$$

$$\beta_{\text{довгий норм}} = \{0.201, 0.400, 0.601, 0.801, 1.0\}$$

4. «Швидкість підйому платформи»

$$\beta_{\text{горизонтальний норм}} = \{1.0, 0.801, 0.601, 0.400, 0.201\}$$

$$\beta_{\text{оптимальний норм}} = \{0.200, 0.600, 1.0, 0.600, 0.200\}$$

$$\beta_{\text{вертикальний норм}} = \{0.201, 0.400, 0.601, 0.801, 1.0\}$$

5. «Товщина дренажу смоли[0.1–1 мм]»

$$\beta_{\text{тонкий норм}} = \{1.0, 0.801, 0.601, 0.400, 0.201\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.200, 0.600, 1.0, 0.600, 0.200\}$$

$$\beta_{\text{товстий норм}} = \{0.201, 0.400, 0.601, 0.801, 1.0\}$$

На основі отриманих результатів, виконаємо графічну візуалізацію нечітких множин:

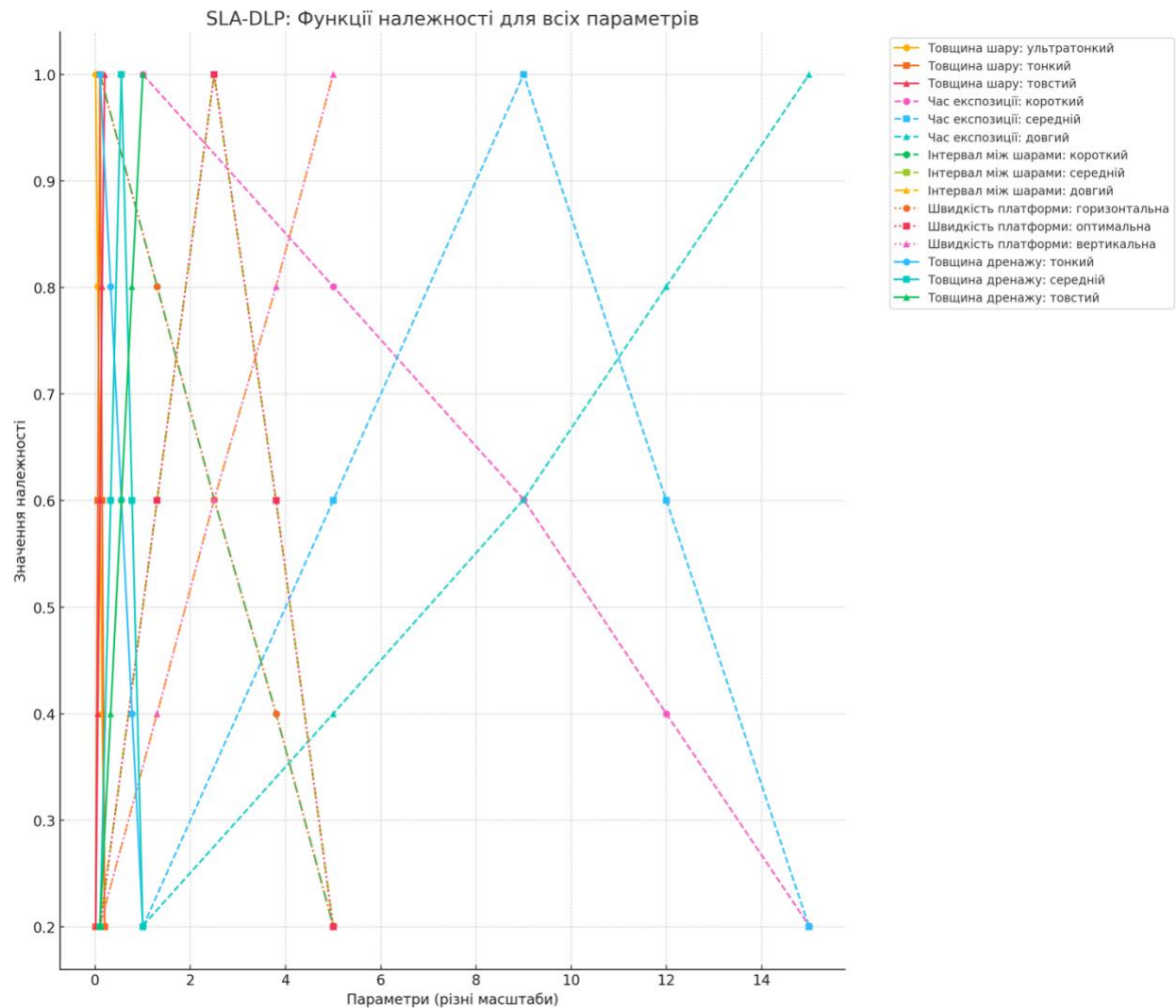


Рис. 4.2.1.1. Функція належності факторів з ЛЗ «Параметри слайсера» SLA-DLP FDM-FFF

1. «Товщина шару [0.08, 0.15]»

$$a_1 = 0.08, a_2 = 0.095, a_3 = 0.11, a_4 = 0.125, a_5 = 0.15$$

$$\beta_{\text{ультратонкий норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{тонкий норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{товстий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

2. «Товщина заповнення та стінок [15–25% чи 0.8–2 мм]»

$$a_1 = 15\%, a_2 = 17\%, a_3 = 19\%, a_4 = 21\%, a_5 = 25\%.$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

3. «Температура екструдера [0.1–5 с]»

PLA[190–210°C]

$$a1 = 190, a2 = 195, a3 = 200, a4 = 205, a5 = 210.$$

$$\beta_{\text{низький норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

ABS[230–250°C]

$$a1 = 230, a2 = 235, a3 = 240, a4 = 245, a5 = 250$$

$$\beta_{\text{низький норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

TPU[220–240°C]

$$a1 = 220, a2 = 225, a3 = 230, a4 = 235, a5 = 240.$$

$$\beta_{\text{низький норм}} = 0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

4. «Температура сопла та стола»

Сопло [180–220°C]: $a1 = 180, a2 = 190, a3 = 200, a4 = 210, a5 = 220.$

Стіл [20–60°C]: $a1 = 20, a2 = 30, a3 = 40, a4 = 50, a5 = 60.$

PLA[190–210°C]

$$a1 = 190, a2 = 195, a3 = 200, a4 = 205, a5 = 210.$$

$$\beta_{\text{низький норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

ABS[230–250°C]

$$a1 = 230, a2 = 235, a3 = 240, a4 = 245, a5 = 250$$

$$\beta_{\text{низький норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

TPU[220–240°C]

$$a1 = 220, a2 = 225, a3 = 230, a4 = 235, a5 = 240.$$

$$\beta_{\text{низький норм}} = 0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

На основі отриманих результатів, виконаємо графічну візуалізацію нечітких множин:

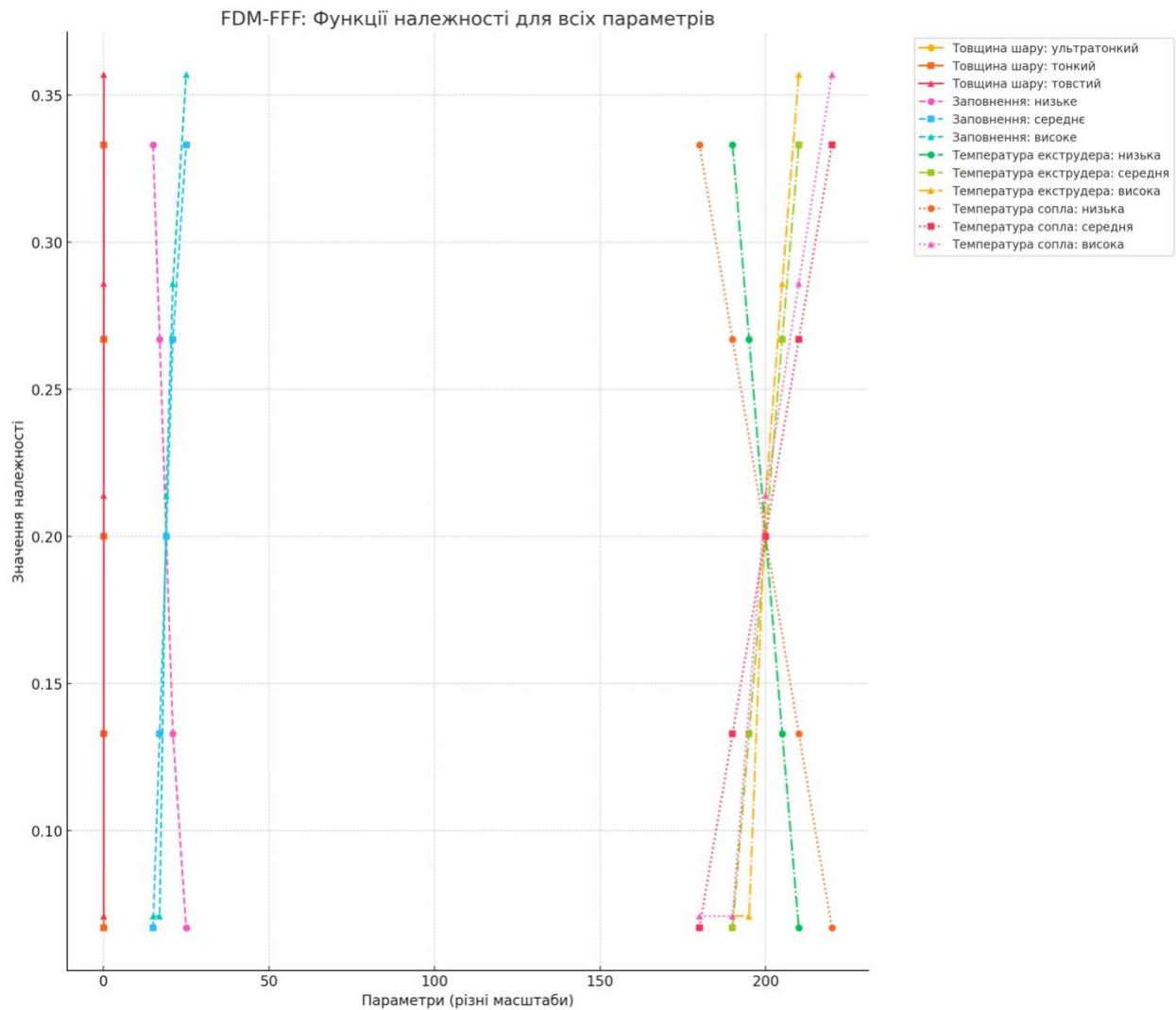


Рис. 4.2.1.2. Функція належності факторів з ЛЗ «Параметри слайсера» FDM-FFF SLS:

1. «Товщина шару [0.04–0.15 мм]»

$$a1 = 0.04, a2 = 0.065, a3 = 0.09, a4 = 0.115, a5 = 0.15$$

$$\beta_{\text{ультратонкий норм}} = 0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067$$

$$\beta_{\text{тонкий норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{товстий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

2. «Товщина заповнення та стінок [10–50% чи 0.5–2.5 мм]»

$$a1 = 10\%, a2 = 20\%, a3 = 30\%, a4 = 40\%, a5 = 50\%.$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

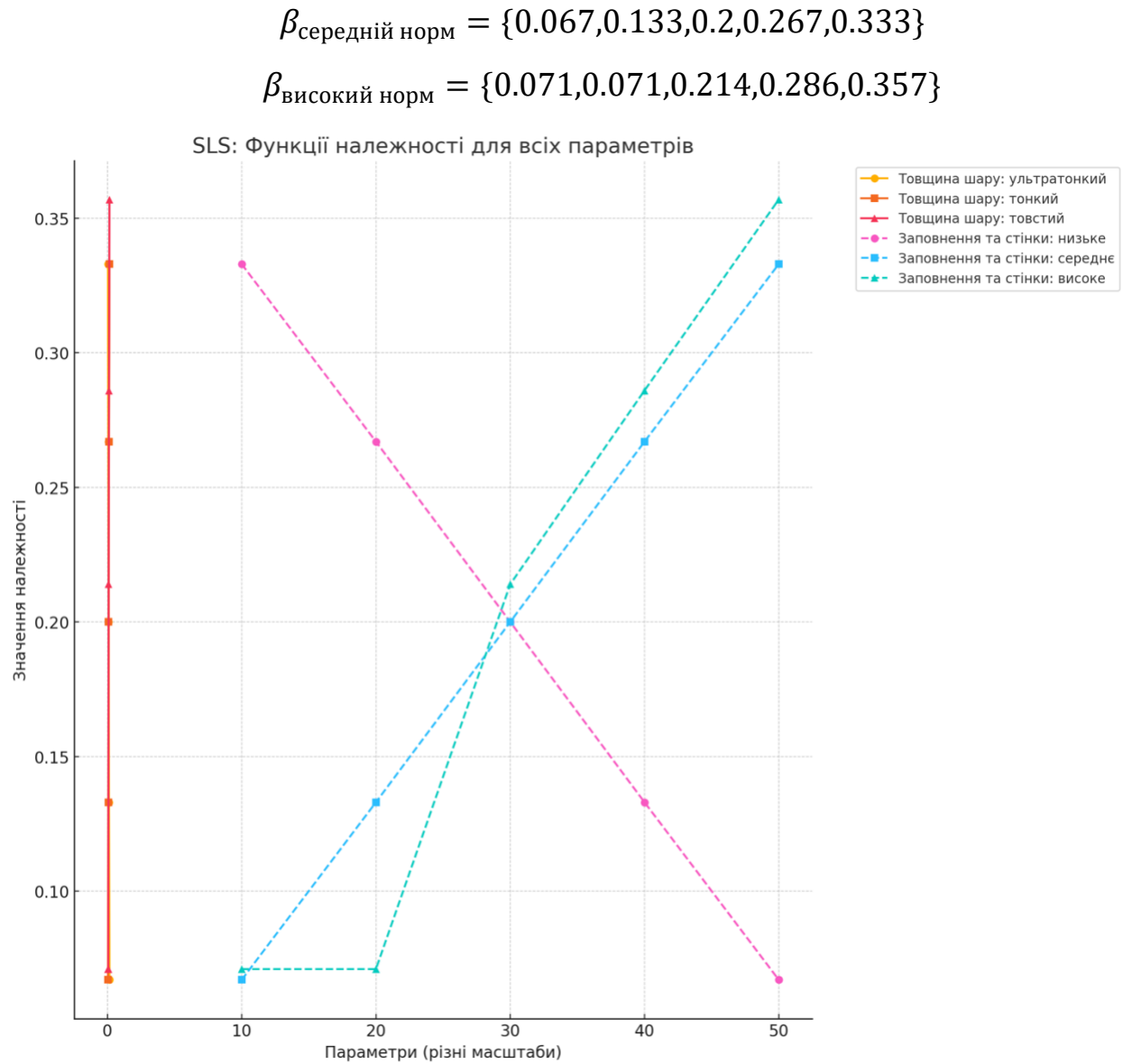


Рис. 4.2.1.3. Функція належності факторів з ЛЗ «Параметри слайсера» SLS

PolyJet:

1. «Товщина шару [0.016–0.03 мм]»

$$a_1 = 0.016, a_2 = 0.02, a_3 = 0.024, a_4 = 0.028, a_5 = 0.03.$$

$$\beta_{\text{ультратонкий норм}} = 0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067$$

$$\beta_{\text{тонкий норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{товстий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

2. «Режим струменевої подачі матеріалу [низька, середня, висока]»

$$a_1 = 1\%, a_2 = 25\%, a_3 = 50\%, a_4 = 75\%, a_5 = 100\%.$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

3. «Температура камери [20–40°C]

$$a1 = 20\%, a2 = 25\%, a3 = 30\%, a4 = 35\%, a5 = 40\%.$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{високий норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

4. «Тип смоли [прозора, стандартна, еластична]

$$a1 = 1, a2 = 1.5, a3 = 2, a4 = 2.5, a5 = 3$$

$$\beta_{\text{стандартна норм}} = \{0.333, 0.267, 0.2, 0.133, 0.067\}$$

$$\beta_{\text{прозора норм}} = \{0.067, 0.133, 0.2, 0.267, 0.333\}$$

$$\beta_{\text{еластична норм}} = \{0.071, 0.071, 0.214, 0.286, 0.357\}$$

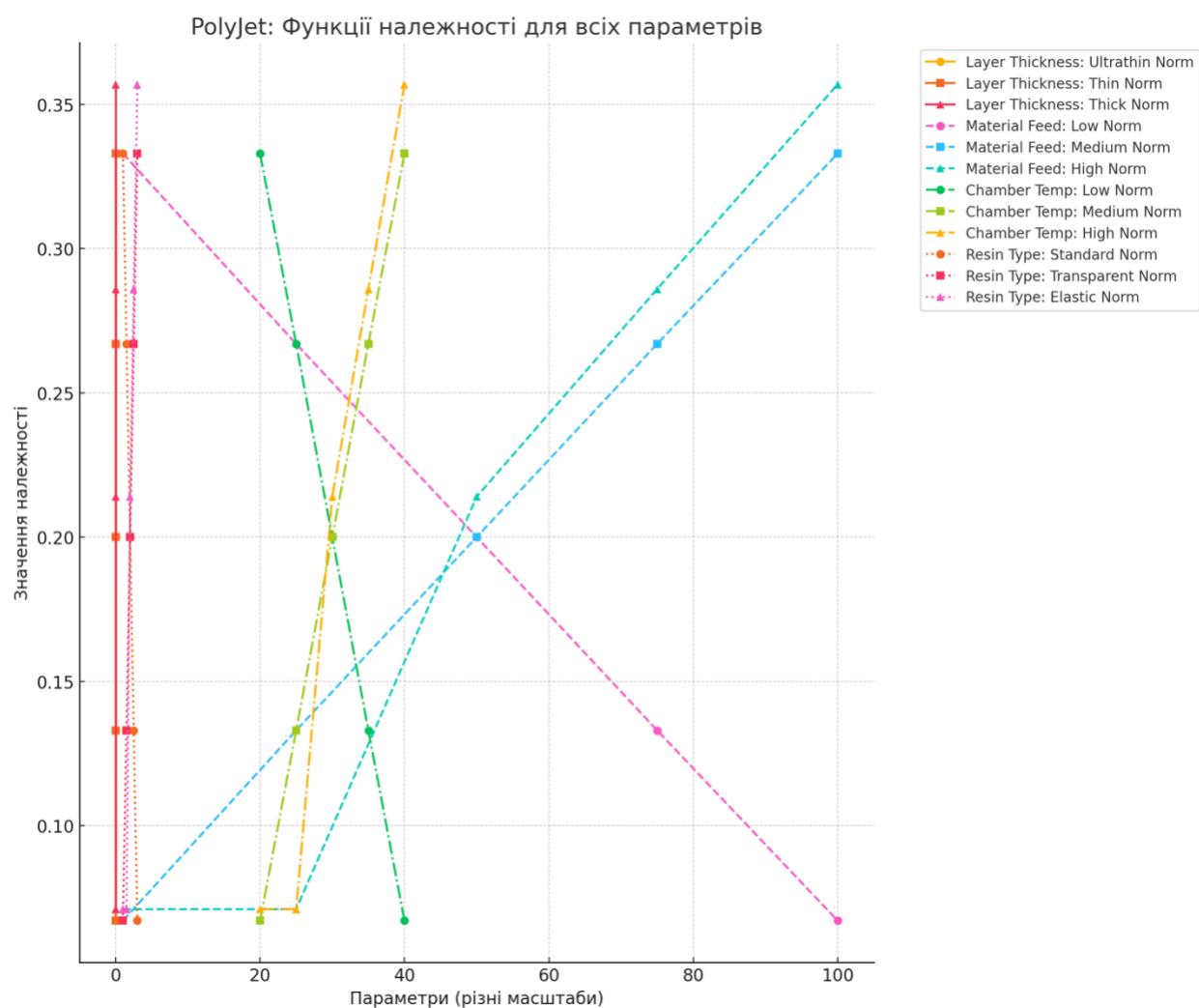


Рис. 4.2.1.4. Функція належності факторів з ЛЗ «Параметри слайсера» PolyJet

2. Параметри 3D-принтера(q_2): SLA-DLP:

1. «Потужність LED лазера джерела світла[10–500] мВт/см²»

$$a_1 = 10, a_2 = 132.5, a_3 = 255.0, a_4 = 377.5, a_5 = 500.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.310, 0.009, 0.000026, 0.000000007$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.004, 0.205, 0.969, 0.440, 0.019\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000000007, 0.000026, 0.009, 0.310, 1.0\}$$

2. «Температура смоли[20–40] °C»

$$a1 = 20.0, a2 = 25.0, a3 = 30.0, a4 = 35.0, a5 = 40.0 \beta_{\text{низький норм}}$$

$$= \{1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

3. «Підйом платформи [100–200] мм»

$$a1 = 100.0, a2 = 125.0, a3 = 150.0, a4 = 175.0, a5 = 250.0 \beta_{\text{маленький норм}}$$

$$= \{1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.0000037\}$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.004, 0.122, 0.726, 0.904, 0.236\}$$

$$\beta_{\text{великий норм}} = \{0.0000000006, 0.000000003, 0.0000037, 0.00088, 0.044\}$$

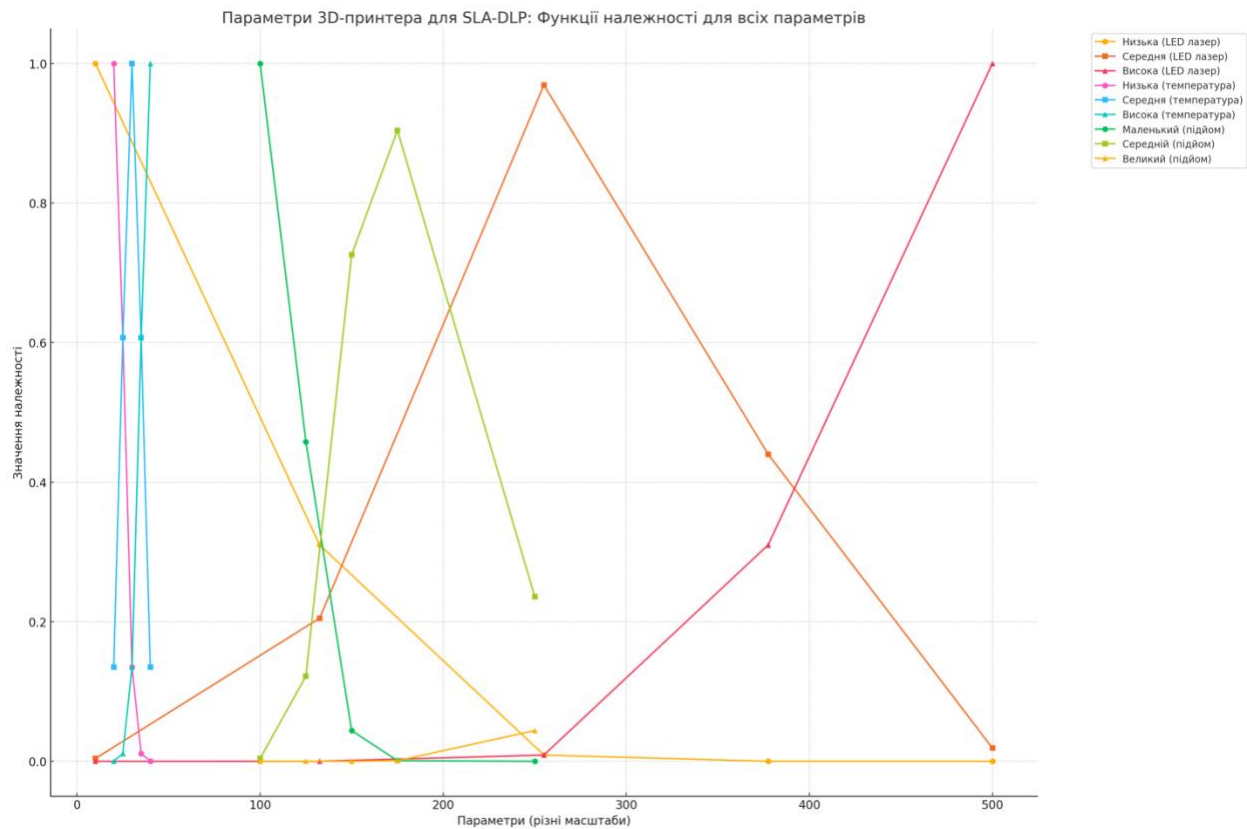


Рис. 4.2.2.1. Функція належності факторів з ЛЗ «Параметри 3D-принтера» SLA-DLP

FDM-FFF:

1. «Калібрування столу ± 0.1 мм, ± 0.05 мм, ± 0.01 мм»

$$a_1 = 0.01, a_2 = 0.0325, a_3 = 0.055, a_4 = 0.0775, a_5 = 0.01$$

$$\beta_{\text{груба норм}} = 1.0, 0.531, 0.080, 0.0034, 0.00004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.682, 0.969, 0.389, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{точна норм}} = \{0.00004, 0.0034, 0.080, 0.531, 1.0\}$$

2. «Швидкість подачі ниткоподібного матеріалу [40–100] мм/с»

$$a_1 = 40.0, a_2 = 55.0, a_3 = 70.0, a_4 = 85.0, a_5 = 100.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.325, 0.011, 0.00004, 0.000000015\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.011, 0.325, 1.0, 0.325, 0.011\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000000015, 0.00004, 0.011, 0.325, 1.0\}$$

3. «Калібрування осі ± 0.1 мм, ± 0.05 мм, ± 0.01 мм»

$$a_1 = 0.01, a_2 = 0.0325, a_3 = 0.055, a_4 = 0.0775, a_5 = 0.01 \beta_{\text{грубанорм}}$$

$$= \{1.0, 0.531, 0.080, 0.0034, 0.00004\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.682, 0.969, 0.389, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{точна норм}} = \{0.00004, 0.0034, 0.080, 0.531, 1.0\}$$

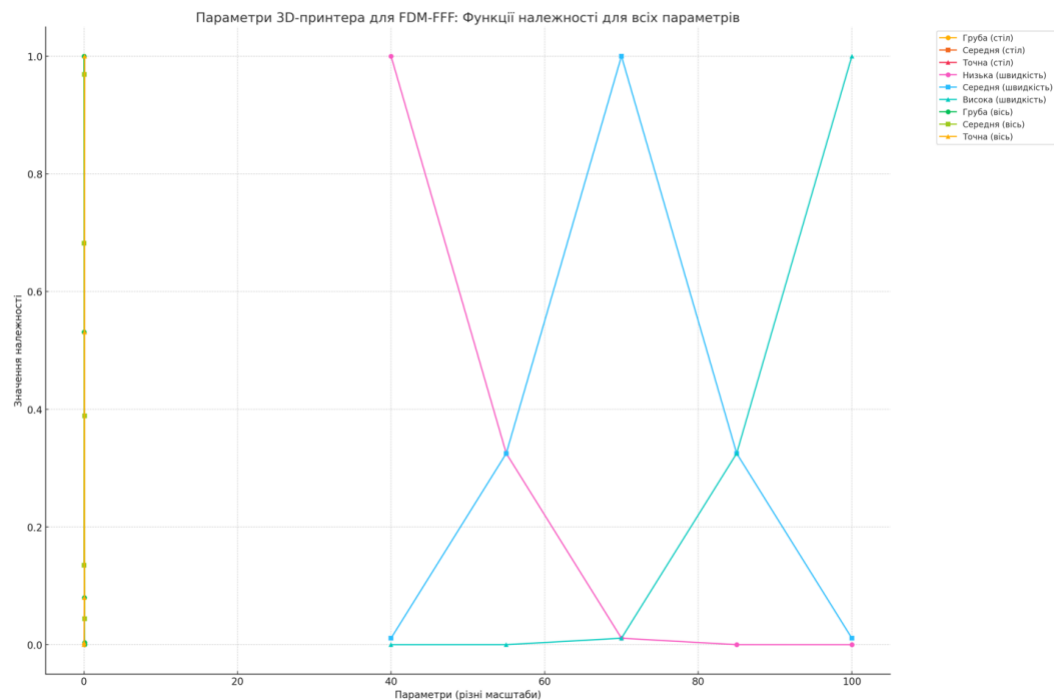


Рис. 4.2.2.2. Функція належності факторів з ЛЗ «Параметри 3D-принтера» FDM-FFF

SLS:

1. «Потужність лазера [20–100] Вт»

$$a_1 = 20.0, a_2 = 40.0, a_3 = 60.0, a_4 = 80.0, a_5 = 100.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.411, 0.028, 0.00034, 0.00000067\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.028, 0.411, 1.0, 0.411, 0.028\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00000067, 0.00034, 0.028, 0.411, 1.0\}$$

2. «Швидкість друку [1–5] мм/хв»

$$a_1 = 1.0, a_2 = 2.0, a_3 = 3.0, a_4 = 4.0, a_5 = 5.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.135, 0.00034, 0.000000015, 0.0000000000000001266\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.00034, 0.135, 1.0, 0.135, 0.00034\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0000000000000001266, 0.000000015, 0.00034, 0.135, 1.0\}$$

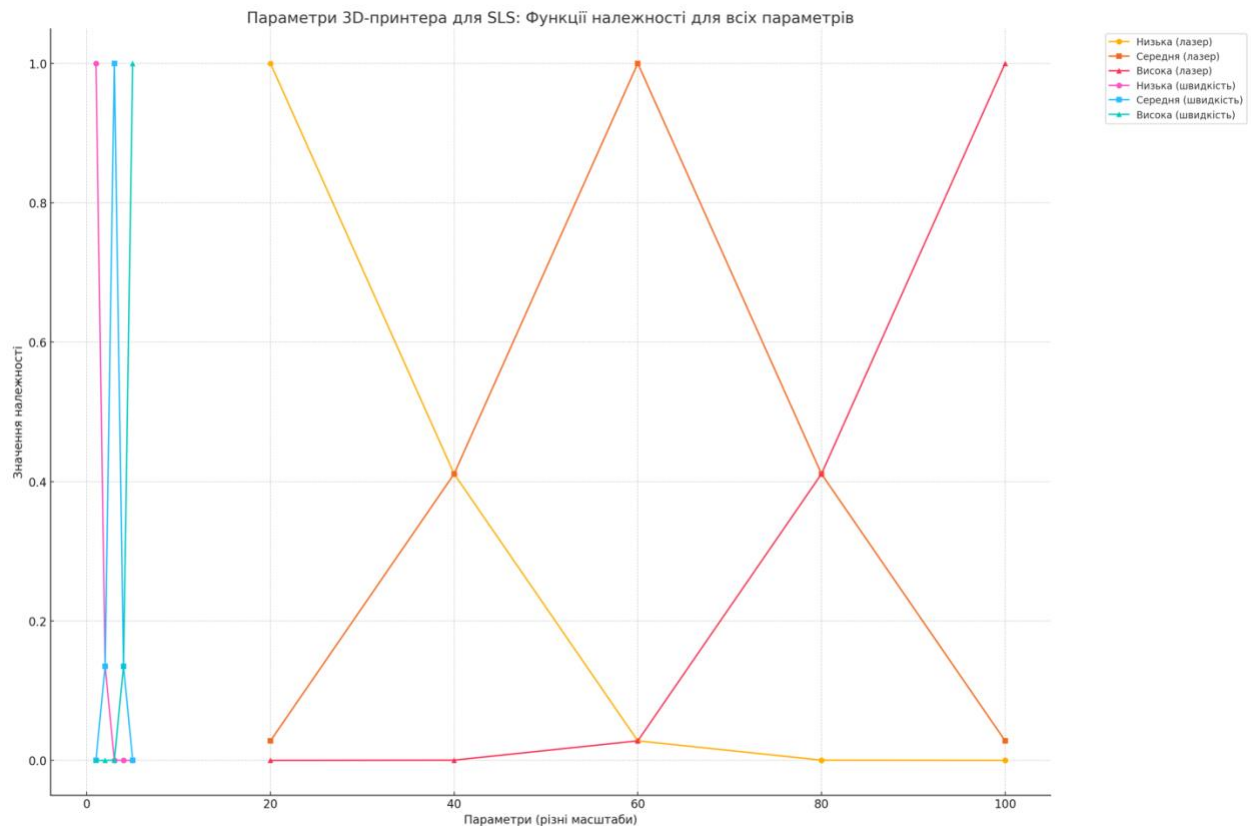


Рис. 4.2.2.3. Функція належності факторів з ЛЗ «Параметри 3D-принтера» SLS

PolyJet:**1. «Температура камери [20–40] °C»**

$$a1 = 20.0, a2 = 25.0, a3 = 30.0, a4 = 35.0, a5 = 40.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

2. «Тиск подачі матеріалу [2–10] бар»

$$a1 = 2.0, a2 = 4.0, a3 = 6.0, a4 = 8.0, a5 = 10.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.411, 0.029, 0.0003, 0.0000007\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.029, 0.411, 1.0, 0.411, 0.029\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0000007, 0.0003, 0.029, 0.411, 1.0\}$$

3. «Тип смоли [1-прозора, 3-стандартна, 5-еластична]»

$$a1 = 1.0, a2 = 2.0, a3 = 3.0, a4 = 4.0, a5 = 5.0$$

$$\beta_{\text{прозора норм}} = \{1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.000004\}$$

$$\beta_{\text{стандартна норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{еластична норм}} = \{0.000004, 0.00088, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

4. «Температура подачі матеріалу [20–60] °C»

$$a1 = 20.0, a2 = 30.0, a3 = 40.0, a4 = 50.0, a5 = 60.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

5. «Швидкість струменевої подачі матеріалу [0.1–1.0] мл/с»

$$a1 = 0.1, a2 = 0.325, a3 = 0.55, a4 = 0.775, a5 = 1.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.531, 0.080, 0.0034, 0.00004\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.682, 0.969, 0.389, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00004, 0.0034, 0.080, 0.531, 1.0\}$$

6. «Інтенсивність UV-затвердіння [50–500] мВт/см²»

$$a1 = 50.0, a2 = 162.5, a3 = 275.0, a4 = 387.5, a5 = 500.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.531, 0.080, 0.0034, 0.00004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.044, 0.389, 0.969, 0.682, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00004, 0.0034, 0.080, 0.531, 1.0\}$$

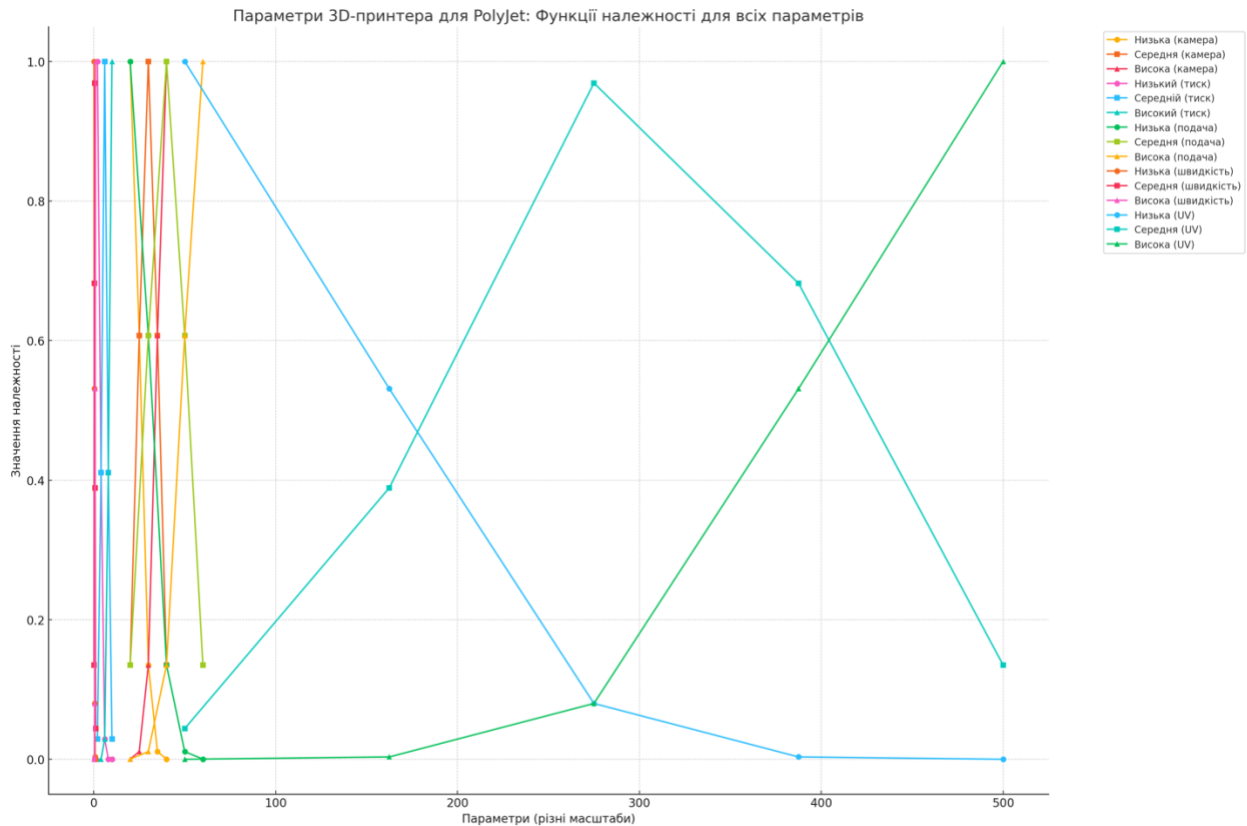


Рис. 4.2.2.4. Функція належності факторів з ЛЗ «Параметри 3D-принтера» PolyJet

3. Розміри крапок тексту шрифтом Брайля (r_1)

1. «Висота крапки [0.1–1.0] мм»

$$a1 = 0.1, a2 = 0.325, a3 = 0.55, a4 = 0.775, a5 = 1.0 \beta_{\text{низька норм}}$$

$$= \{1.0, 0.325, 0.0111, 0.00004, 0.000000015\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0111, 0.325, 1.0, 0.325, 0.0111\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000000015, 0.00004, 0.0111, 0.325, 1.0\}$$

2. «Діаметр крапки [0.8–2.0] мм»

$$a1 = 0.8, a2 = 1.1, a3 = 1.4, a4 = 1.7, a5 = 2.0 \beta_{\text{низька норм}}$$

$$= \{1.0, 0.325, 0.0111, 0.00004, 0.000000015\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0111, 0.325, 1.0, 0.325, 0.0111\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000000015, 0.00004, 0.0111, 0.325, 1.0\}$$

3. «Форма крапки [випукла(raised), плоска(flat), втоплена(recessed)]»

$$\text{Контрольні інтервали - відсутні} \beta_{\text{raised норм}} = \{1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0\}$$

$$\beta_{\text{flat норм}} = \{1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0\}$$

$$\beta_{\text{recessed норм}} = \{1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0\}$$

4. «Розташування крапок [0.0–2.5] мм»

$$a1 = 0.0, a2 = 0.625, a3 = 1.25, a4 = 1.875, a5 = 2.5$$

$$\beta_{\text{вузьке норм}} = .0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.0000037$$

$$\beta_{\text{оптимальне норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{широке норм}} = \{0.0000037, 0.00088, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

5. «Пробіл між крапками [0.5–2.5] мм»

$$a1 = 0.5, a2 = 1.0, a3 = 1.5, a4 = 2.0, a5 = 2.5$$

$$\beta_{\text{маленький норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.0111, 0.00034$$

$$\beta_{\text{оптимальний норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{великий норм}} = \{0.00034, 0.0111, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

6. «Пробіл між осередками Брайля [2.0–5.0] мм»

$$a1 = 2.0, a2 = 2.75, a3 = 3.5, a4 = 4.25, a5 = 5.0$$

$$\beta_{\text{вузький норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.0111, 0.00034$$

$$\beta_{\text{оптимальний норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{широкий норм}} = \{0.00034, 0.0111, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

7. «Гострота границь крапки [0-1]»

$$a_1 = 0.0, a_2 = 0.25, a_3 = 0.5, a_4 = 0.75, a_5 = 1.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.0000037$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.0000037\}$$

8. «Стійкість крапки до тиску [0-1]»

$$a_1 = 0.0, a_2 = 0.25, a_3 = 0.5, a_4 = 0.75, a_5 = 1.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.0000037$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0000037, 0.00088, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

9. «Розрізнення крапки в рядку [0-1]»

$$a_1 = 0.0, a_2 = 0.25, a_3 = 0.5, a_4 = 0.75, a_5 = 1.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.0000037$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0000037, 0.00088, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

10. «Взаємодія крапок з поверхнею [0-1]»

$$a_1 = 0.0, a_2 = 0.25, a_3 = 0.5, a_4 = 0.75, a_5 = 1.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.0000037$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0000037, 0.00088, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

11. «Склад матеріалу крапки [жорсткий, еластичний, гладкий]»

Контрольні інтервали - відсутні

$$\beta_{\text{еластичний норм}} = 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0$$

$$\beta_{\text{гладкий норм}} = \{1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0\}$$

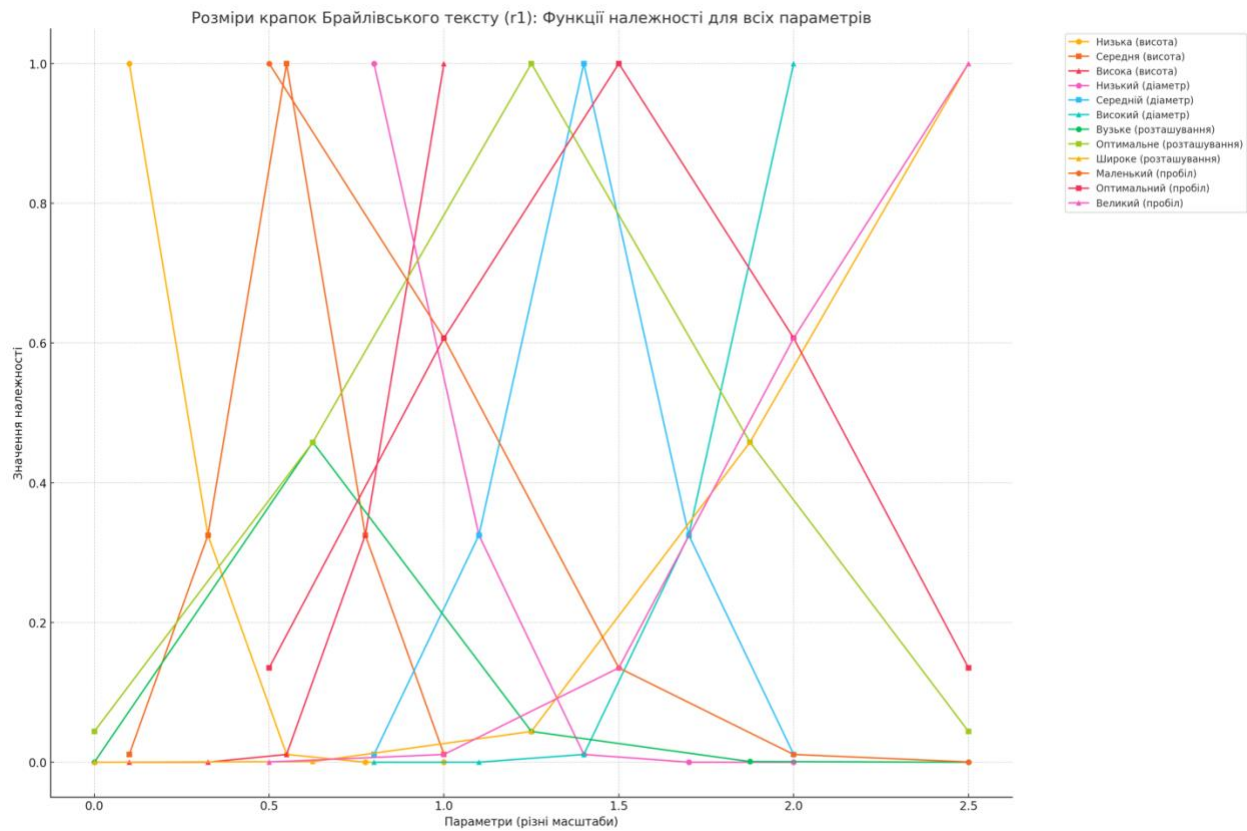


Рис. 4.2.3.1. Функція належності факторів з ЛЗ «Розміри крапок тексту шрифтом Брайля»

4. Фізико-механічні властивості(r₂)

SLA-DLP:

1. «Модуль гнучкості [1000–4000] МПа»

$$a_1 = 1000.0, a_2 = 1750.0, a_3 = 2500.0, a_4 = 3250.0, a_5 = 4000.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.325, 0.011, 0.00004, 0.00000002$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.882, 0.607, 0.044, 0.00034\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00000002, 0.00004, 0.011, 0.325, 1.0\}$$

2. «Удароміцність [2–20] кДж/м²»

$$a_1 = 2.0, a_2 = 6.5, a_3 = 11.0, a_4 = 15.5, a_5 = 20.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.531, 0.080, 0.003, 0.00004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.682, 0.969, 0.389, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00004, 0.003, 0.080, 0.531, 1.0\}$$

3. «Коефіцієнт тертя [0.05–0.4]»

$$a_1 = 0.05, a_2 = 0.1375, a_3 = 0.225, a_4 = 0.3125, a_5 = 0.4$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.216, 0.002, 0.000001, 0.00000002$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.011, 0.458, 0.882, 0.080, 0.00034\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00000002, 0.000001, 0.002, 0.216, 1.0\}$$

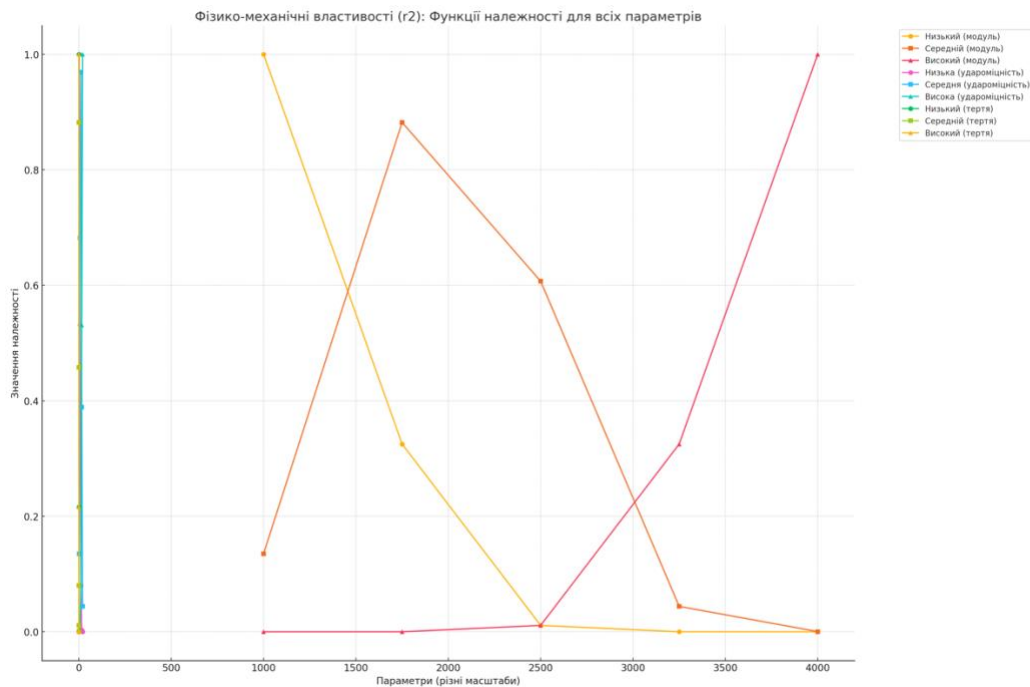


Рис. 4.2.4. Функція належності факторів з ЛЗ «Фізико-механічних властивостей»
SLA-DLP

FDM-FFF:

1. «Модуль гнучкості [500–3000] МПа»

$$a_1 = 500.0, a_2 = 1125.0, a_3 = 1750.0, a_4 = 2375.0, a_5 = 3000.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.458, 0.044, 0.0009, 0.000004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.011, 0.216, 0.882, 0.755, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000004, 0.0009, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

2. «Удароміцність [5–50] кДж/м²»

$$a_1 = 5.0, a_2 = 16.25, a_3 = 27.5, a_4 = 38.75, a_5 = 50$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.531, 0.080, 0.003, 0.00004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.080, 0.531, 1.0, 0.531, 0.080\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00004, 0.003, 0.080, 0.531, 1.0\}$$

3. «Коефіцієнт тертя [0.1–0.6]»

$$a_1 = 0.1, a_2 = 0.225, a_3 = 0.35, a_4 = 0.475, a_5 = 0.6$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.458, 0.044, 0.0009, 0.000004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.011, 0.216, 0.882, 0.755, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000004, 0.0009, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

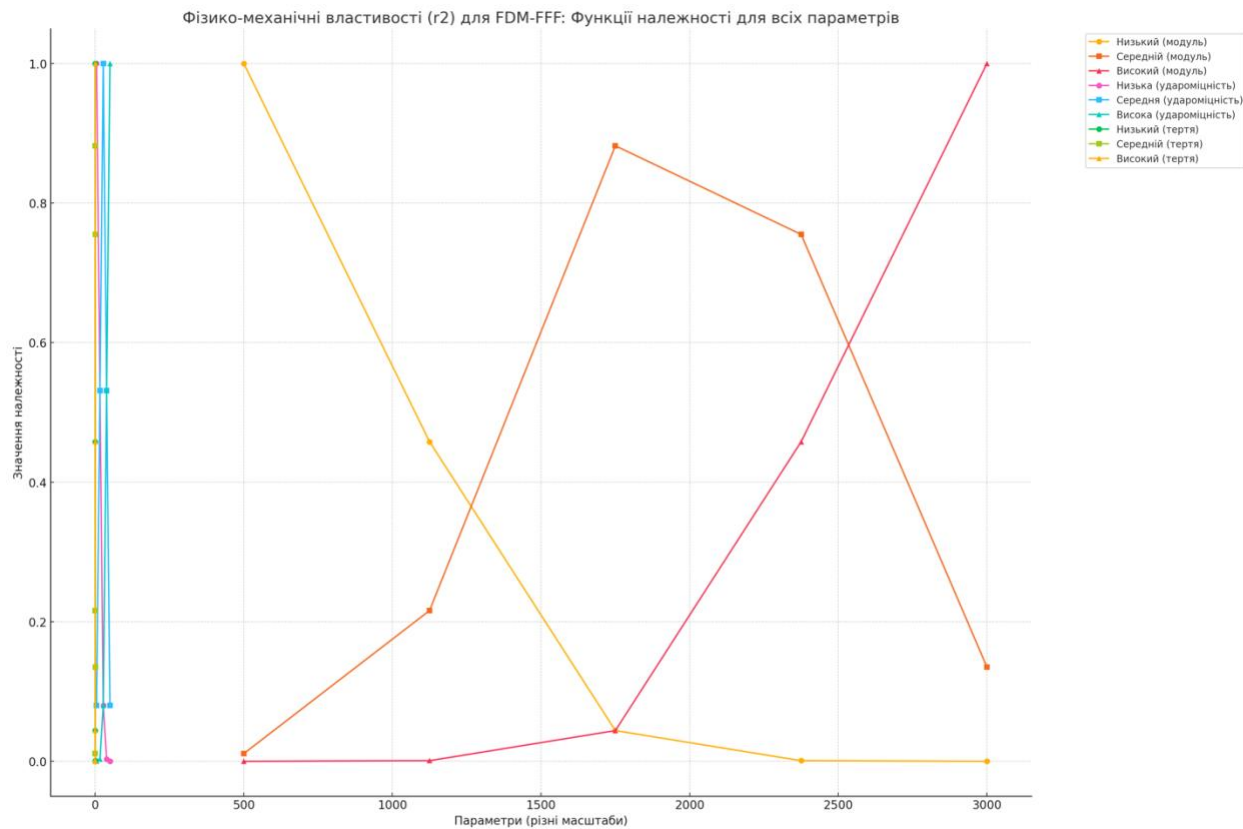


Рис. 4.2.4.2. Функція належності факторів з ЛЗ «Фізико-механічних властивостей» FDM-FFF

SLS:

1. «Модуль гнучкості [800–2500] МПа»

$$a_1 = 800.0, a_2 = 1225.0, a_3 = 1650.0, a_4 = 2075.0, a_5 = 2500$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.569, 0.105, 0.006, 0.0001$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.644, 0.992, 0.494, 0.080\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0001, 0.006, 0.105, 0.569, 1.0\}$$

2. «Удароміцність [10–60] кДж/м²²»

$$a_1 = 10.0, a_2 = 22.5, a_3 = 35.0, a_4 = 47.5, a_5 = 60$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.0000037\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{високанорм}} = \{0.0000037, 0.00088, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

3. «Коефіцієнт тертя [0.2–0.8]»

$$a_1 = 0.2, a_2 = 0.35, a_3 = 0.5, a_4 = 0.65, a_5 = 0.8$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = \{1.0, 0.325, 0.011, 0.00004, 0.000000015\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.011, 0.325, 1.0, 0.325, 0.011\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000000015, 0.00004, 0.011, 0.325, 1.0\}$$

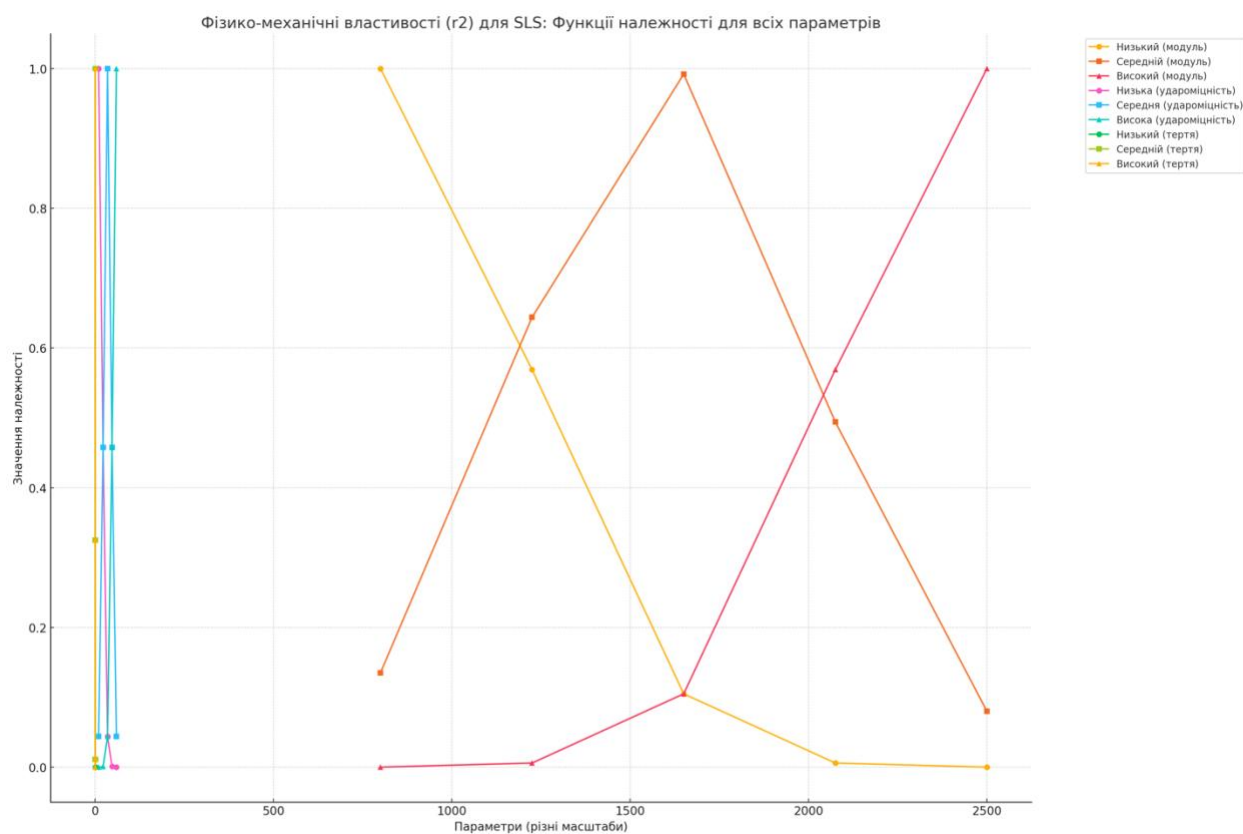


Рис. 4.2.4.3. Функція належності факторів з ЛЗ «Фізико-механічних властивостей» SLS

PolyJet:**1. «Модуль гнучкості [200–3000] МПа»**

$$a1 = 200, a2 = 900.0, a3 = 1600.0, a4 = 2300.0, a5 = 3000.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.216, 0.002, 0.000001, 0.00000002$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.002, 0.216, 1.0, 0.216, 0.002\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00000002, 0.000001, 0.002, 0.216, 1.0\}$$

2. «Удароміцність [3–15] кДж/м²²»

$$a1 = 3.0, a2 = 6.0, a3 = 9.0, a4 = 12.0, a5 = 15$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.00034$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00034, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

3. «Коефіцієнт тертя [0.1–0.5]»

$$a1 = 0.1, a2 = 0.2, a3 = 0.3, a4 = 0.4, a5 = 0.5$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.00034$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00034, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

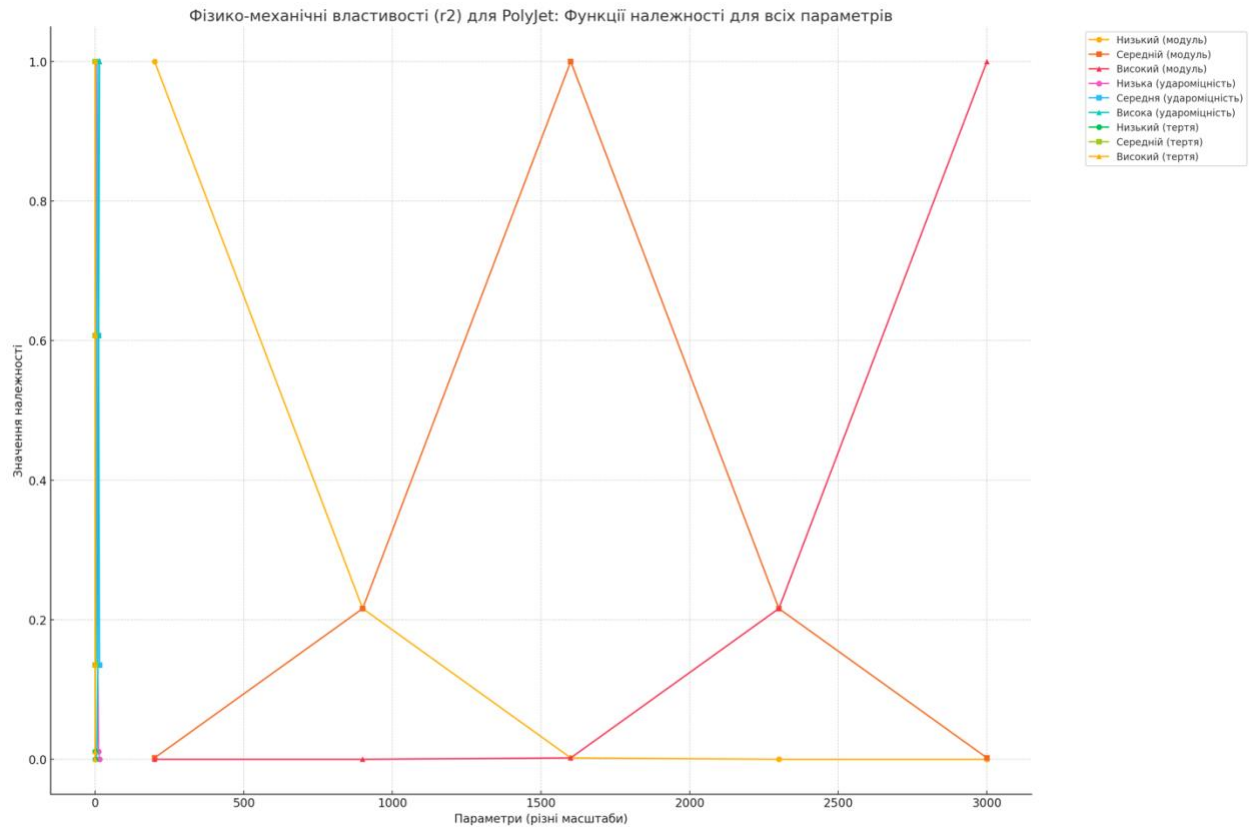


Рис. 4.2.4.4. Функція належності факторів з ЛЗ «Фізико-механічних властивостей» PolyJet

5. Постдрукарські процеси(r3)

SLA-DLP/FDM-FFF/SLS/PolyJet:

1. «Зняття підтримки [1-10] хв»

$$a1 = 1, a2 = 3.25, a3 = 5.5, a4 = 7.75, a5 = 10$$

$$\beta_{\text{швидке норм}} = 1.0, 0.531, 0.0796, 0.0034, 0.00004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0796, 0.531, 1.0, 0.531, 0.0796\}$$

$$\beta_{\text{довге норм}} = \{0.00004, 0.0034, 0.0796, 0.531, 1.0\}$$

2. «Очищення моделі [1-15] хв»

$$a1 = 1.0, a2 = 4.5, a3 = 8.0, a4 = 11.5, a5 = 15.0$$

$$\beta_{\text{легке норм}} = 1.0, 0.682, 0.216, 0.0319, 0.0022$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.531, 0.969, 0.823, 0.325\}$$

$$\beta_{\text{ретельне норм}} = \{0.0022, 0.0319, 0.216, 0.682, 1.0\}$$

3. «Фінальне затвердіння [5-60] хв»

$$a_1 = 5, a_2 = 18.75, a_3 = 32.5, a_4 = 46.25, a_5 = 60$$

$$\beta_{\text{коротке норм}} = \{1.0, 0.389, 0.0228, 0.0002, 0.00000027\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0439, 0.531, 0.969, 0.267, 0.0111\}$$

$$\beta_{\text{довге норм}} = \{0.00000027, 0.0002, 0.0228, 0.389, 1.0\}$$

4. «Шліфування [0-100]% покриття»

$$a_1 = 0.0, a_2 = 25.0, a_3 = 50.0, a_4 = 75.0, a_5 = 100.0$$

$$\beta_{\text{невелике норм}} = \{1.0, 0.458, 0.0439, 0.0009, 0.000004\}$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0439, 0.458, 1.0, 0.458, 0.0439\}$$

$$\beta_{\text{повне норм}} = \{0.000004, 0.0009, 0.0439, 0.458, 1.0\}$$

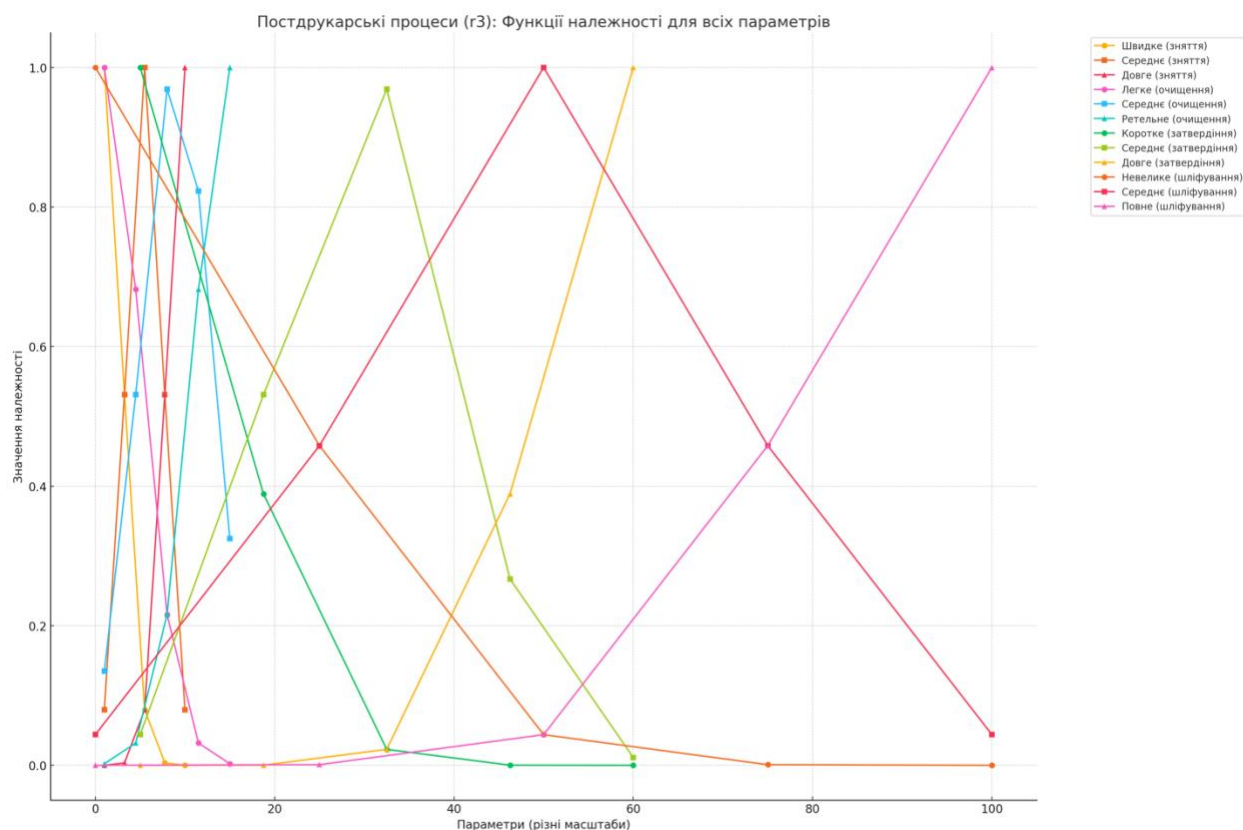


Рис. 4.2.5.1. Функція належності факторів з ЛЗ «Постдрукерські процеси» FDM-FFF/SLA-DLP/SLS/PolyJet

6. Матеріали 3D-моделі(d1)

SLA-DLP:

1. «Міцність (Стандартні смоли): [75–85] D»

$$a1 = 75, a2 = 77.5, a3 = 80, a4 = 82.5, a5 = 85$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

2. «Швидкість затвердіння: [1–15] с»

$$a1 = 1.0, a2 = 4.5, a3 = 8.0, a4 = 11.5, a5 = 15$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

3. «Прозорість: [30–0] %»

$$a1 = 30.0, a2 = 22.5, a3 = 15.0, a4 = 7.5, a5 = 0.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

4. «Міцність (Еластичні смоли): [40–70] A»

$$a1 = 40.0, a2 = 47.5, a3 = 55.0, a4 = 62.5, a5 = 70.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.325, 0.011, 0.00004, 0.000000015$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0003, 0.044, 0.607, 0.882, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000000015, 0.00004, 0.011, 0.325, 1.0\}$$

5. «Розтяжність: [200–300] %»

$$a1 = 200, a2 = 225, a3 = 250, a4 = 275, a5 = 300$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.249, 0.004, 0.0000037, 0.0000000002$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.004, 0.249, 1.0, 0.249, 0.004\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0000000002, 0.0000037, 0.004, 0.249, 1.0\}$$

6. «Довговічність: [5–10] років»

$$a_1 = 5, a_2 = 6.25, a_3 = 7.5, a_4 = 8.75, a_5 = 10$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

7. «Швидкість друку: [10–30] мм/г»

$$a_1 = 10, a_2 = 15, a_3 = 20, a_4 = 25, a_5 = 30$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

8. «Точність друку: [0.01–0.05] мм»

$$a_1 = 0.01, a_2 = 0.02, a_3 = 0.03, a_4 = 0.04, a_5 = 0.05$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

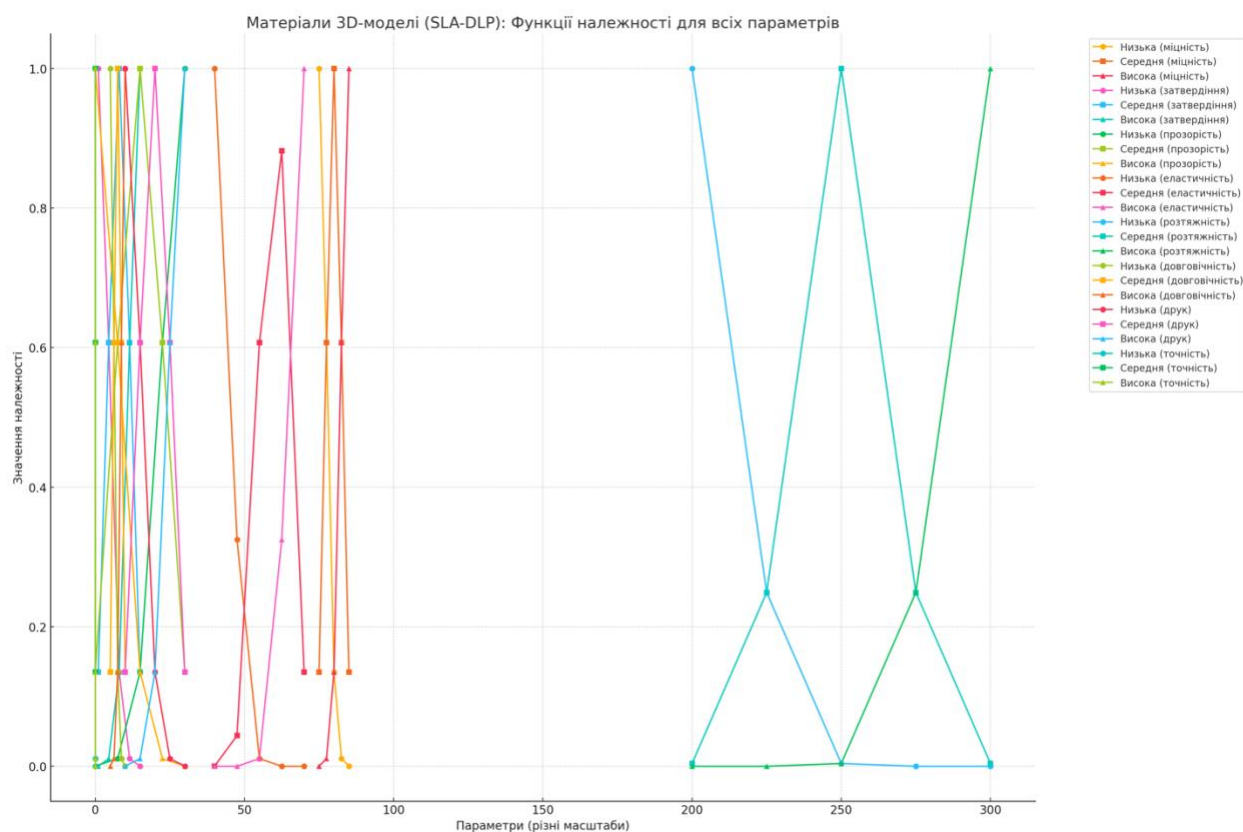


Рис. 4.2.6.1. Функція належності факторів з ЛЗ «Матеріали для 3D-моделі» SLA-DLP

FDM-FFF:

1. «Довговічність: [1–10] років»

$$a_1 = 5, a_2 = 3.25, a_3 = 5.5, a_4 = 7.75, a_5 = 10$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.5311, 0.0796, 0.0034, 0.00004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0796, 0.5311, 1.0, 0.5311, 0.0796\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.00004, 0.0034, 0.0796, 0.5311, 1.0\}$$

2. «Гнучкість (від жорсткого до гнучкого TPU, PLA) [85–95]»

$$a_1 = 85.0, a_2 = 87.5, a_3 = 90.0, a_4 = 92.5, a_5 = 95.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.6065, 0.1353, 0.0111, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.1353, 0.6065, 1.0, 0.6065, 0.1353\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.0111, 0.1353, 0.6065, 1.0\}$$

3. «Міцність (PLA, ABS, TPU) [50–90] МПа»

$$a_1 = 50, a_2 = 60, a_3 = 70, a_4 = 80, a_5 = 90$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.6065, 0.1353, 0.0111, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.1353, 0.6065, 1.0, 0.6065, 0.1353\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.0111, 0.1353, 0.6065, 1.0\}$$

4. «Точність друку: [0.1–0.3] мм»

$$a_1 = 0.01, a_2 = 0.15, a_3 = 0.2, a_4 = 0.25, a_5 = 0.3$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.6065, 0.1353, 0.0111, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.1353, 0.6065, 1.0, 0.6065, 0.1353\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.0111, 0.1353, 0.6065, 1.0\}$$

5. «Швидкість друку: [50–150] мм/с»

$$a_1 = 50, a_2 = 75, a_3 = 100, a_4 = 125, a_5 = 150$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.6065, 0.1353, 0.0111, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.1353, 0.6065, 1.0, 0.6065, 0.1353\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.0111, 0.1353, 0.6065, 1.0\}$$

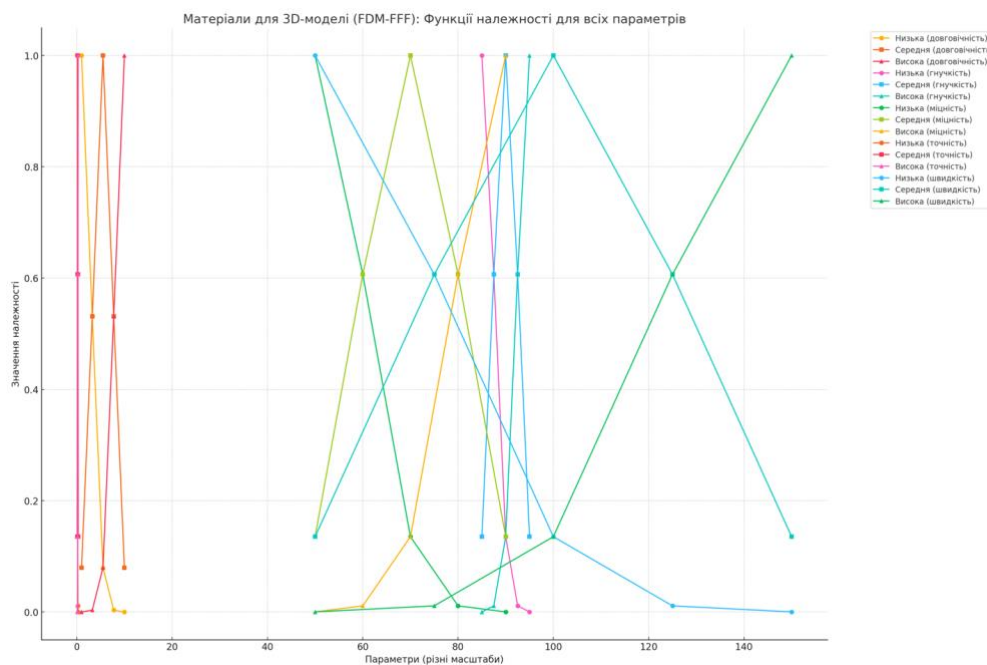


Рис. 4.2.6.2. Функція належності факторів з ЛЗ «Матеріали для 3D-моделі» FDM-FFF

SLS:

1. «Довговічність: [1–15] років»

$$a_1 = 1, a_2 = 3, a_3 = 7.5, a_4 = 12.5, a_5 = 15$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

2. «Гнучкість (РА12, РА11, РА6) [75–80] D»

$$a_1 = 75.0, a_2 = 76.25, a_3 = 77.5, a_4 = 78.75, a_5 = 80.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.000004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000004, 0.00088, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

3. «Міцність (РА12, РА11, РА6) [48–50] МПа»

$$a_1 = 48, a_2 = 48.5, a_3 = 49, a_4 = 49.5, a_5 = 50$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

4. «Точність друку [0.1–0.2] мм»

$$a_1 = 0.1, a_2 = 0.125, a_3 = 0.15, a_4 = 0.175, a_5 = 0.2$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

5. «Швидкість друку: [10–20] мм/г»

$$a_1 = 10, a_2 = 12.5, a_3 = 15, a_4 = 17.5, a_5 = 20$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

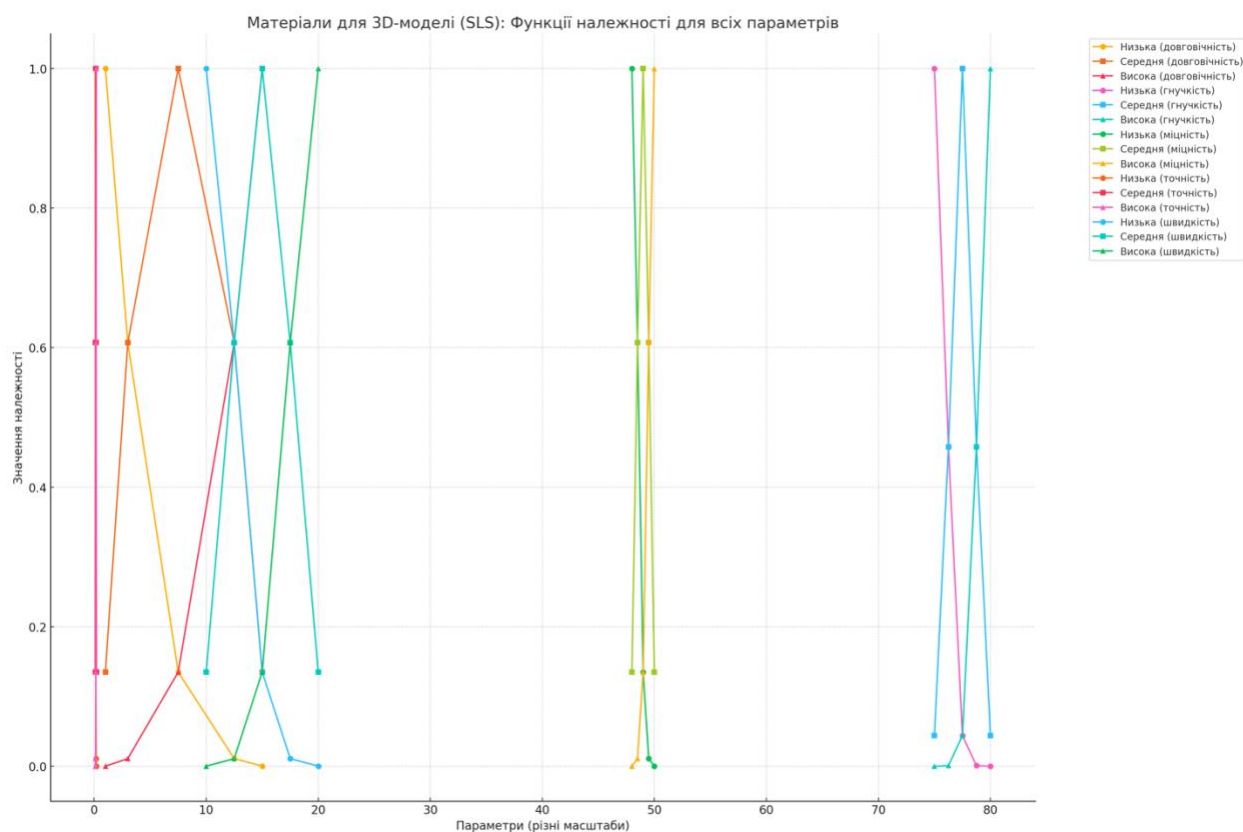


Рис. 4.2.6.3. Функція належності факторів з ЛЗ «Матеріали для 3D-моделі» SLS

PolyJet:

1. «Міцність (Стандартні смоли) [75–85] D»

$$a_1 = 75, a_2 = 77.5, a_3 = 80, a_4 = 82.5, a_5 = 85$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

2. «Швидкість затвердіння [1–15] с»

$$a_1 = 1.0, a_2 = 4.5, a_3 = 8.0, a_4 = 11.5, a_5 = 15.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.458, 0.044, 0.00088, 0.000004$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.044, 0.458, 1.0, 0.458, 0.044\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000004, 0.00088, 0.044, 0.458, 1.0\}$$

3. «Прозорість [30–0] %»

$$a1 = 30, a2 = 22.5, a3 = 15, a4 = 7.5, a5 = 0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

4. «Міцність (Еластичні смоли) [40–70] А»

$$a1 = 40, a2 = 47.5, a3 = 55, a4 = 62.5, a5 = 70$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.325, 0.011, 0.00004, 0.000000015$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.0003, 0.044, 0.607, 0.882, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.000000015, 0.00004, 0.011, 0.325, 1.0\}$$

5. «Розтяжність [200–300] %»

$$a1 = 200, a2 = 225, a3 = 250, a4 = 275, a5 = 300$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.249, 0.004, 0.000004, 0.0000000002$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.004, 0.249, 1.0, 0.249, 0.004\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0000000002, 0.000004, 0.004, 0.249, 1.0\}$$

6. «Довговічність [5–10] років»

$$a1 = 5.0, a2 = 6.25, a3 = 7.5, a4 = 8.75, a5 = 10.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

7. «Швидкість друку [10–30] мм/г»

$$a1 = 10.0, a2 = 15.0, a3 = 20.0, a4 = 25.0, a5 = 30.0$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

8. «Точність друку [0.01–0.05] мм»

$$a1 = 0.01, a2 = 0.02, a3 = 0.03, a4 = 0.04, a5 = 0.05$$

$$\beta_{\text{низька норм}} = 1.0, 0.607, 0.135, 0.011, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середня норм}} = \{0.135, 0.607, 1.0, 0.607, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{висока норм}} = \{0.0003, 0.011, 0.135, 0.607, 1.0\}$$

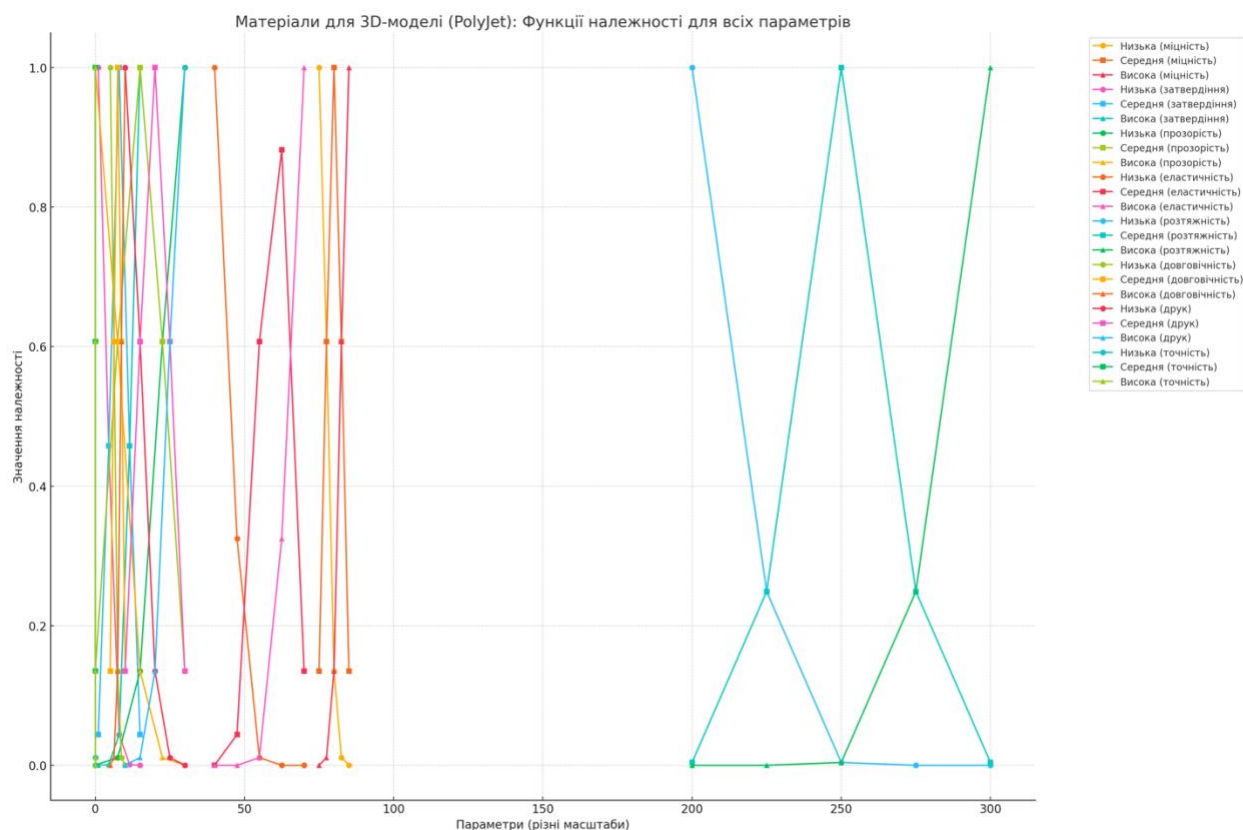


Рис. 4.2.6.4. Функція належності факторів з ЛЗ «Матеріали для 3D-моделі»
PolyJet

7. Розмір клітинок та сітки Брайля (d_2) та Тип шрифту(d_3)

1. «Розмір клітинок з 6 крапок [2.0–4.5] мм»

$$a_1 = 2.0, a_2 = 2.625, a_3 = 3.25, a_4 = 3.875, a_5 = 4.5$$

$$\beta_{\text{маленький норм}} = 0.607, 0.969, 0.325, 0.023, 0.0003$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.011, 0.216, 0.882, 0.755, 0.135\}$$

$$\beta_{\text{великий норм}} = \{0.00004, 0.005, 0.135, 0.755, 0.882\}$$

2. «Розмір сітки [10–150] мм»

$$a_1 = 10.0, a_2 = 45.0, a_3 = 80.0, a_4 = 115.0, a_5 = 150.0$$

$$\beta_{\text{вузький норм}} = 0.607, 0.755, 0.044, 0.00012, 0.000000015$$

$$\beta_{\text{середній норм}} = \{0.011, 0.458, 0.882, 0.080, 0.0003\}$$

$$\beta_{\text{широкий норм}} = \{0.000004, 0.005, 0.325, 0.969, 0.135\}$$

3. «Тип шрифту». Параметр є дискретним.

Braille-3D Font, Braille Embossing Font, Braille Standard Font

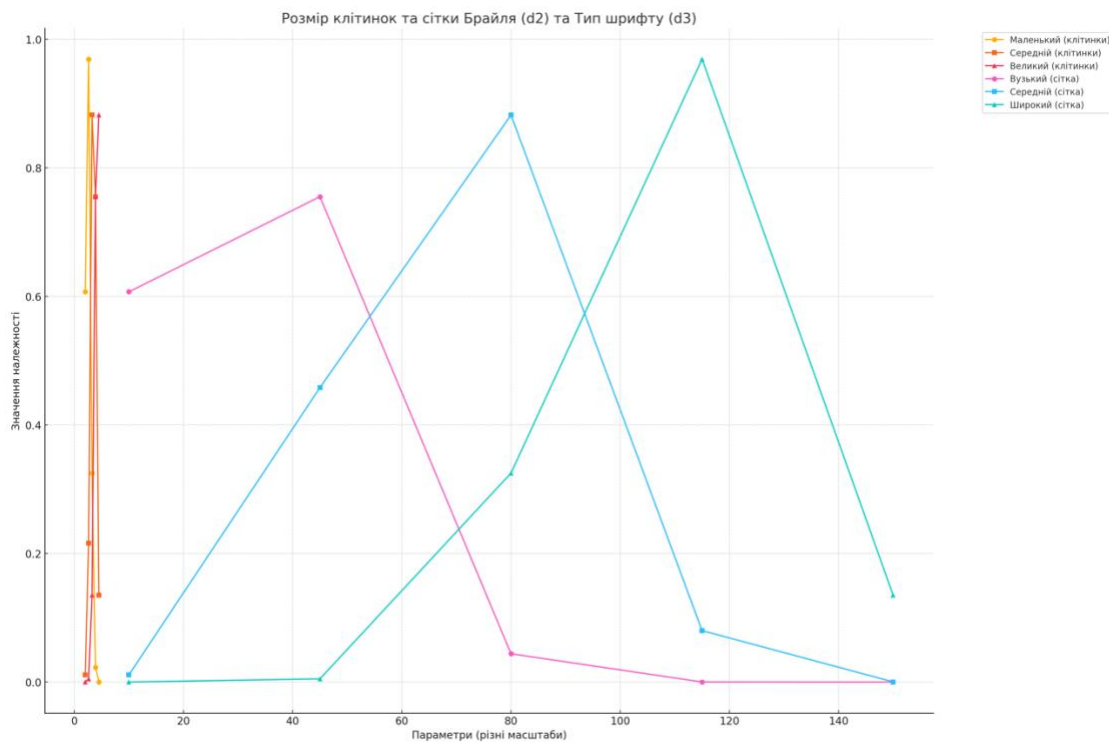


Рис. 4.2.7. Функція належності факторів з ЛЗ «Розмір клітинок та сітки Брайля/ Тип шрифту»

КОД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ «3D Braille CAD»

1. Файлу main.go

```
func main() {
    scanner1 := bufio.NewScanner(os.Stdin)
    scanner := bufio.NewScanner(os.Stdin)

    // Step 1: Get input text

    fmt.Println("Choose an option:")
    fmt.Println("1 - Enter text and generate to 3D-model")
    fmt.Println("2 - Run predictive calculator")
    scanner1.Scan()
    choice := scanner1.Text()

    switch choice {
    case "1":
        fmt.Print("Enter text: ")
        scanner.Scan()
        inputText := scanner.Text()

        // Detect language and generate Braille text
        lang := braille.DetectLanguageManually(inputText)
        brailleText := braille.GenerateBrailleText(inputText, lang)

        // Print and save Braille text
        fmt.Println("Braille text:")
        fmt.Println(brailleText)
        err := braille.SaveBrailleToTextFile("braille_text.txt", inputText, brailleText)
        if err != nil {
            fmt.Println("Error saving Braille text to file:", err)
            return
        }

        // Step 2: Ask if the user wants to generate a 3D model
        fmt.Print("Would you like to generate a 3D model? (yes/no): ")
        scanner.Scan()
        if strings.ToLower(scanner.Text()) != "yes" {
```

```

fmt.Println("3D model generation skipped.")
return
}

// Step 3: Get input text for 3D model
fmt.Print("Enter text for 3D model: ")
scanner.Scan()
inputText3D := scanner.Text()

lang3D := braille.DetectLanguageManually(inputText3D)
brailleText3D := braille.GenerateBraille(inputText3D, lang3D)

// Step 3: Ask if the user wants custom parameters
fmt.Print("Do you want to enter custom parameters for the 3D model? (yes/no): ")
scanner.Scan()
customParams := strings.ToLower(scanner.Text())

var dotRadius, dotHeight, symbolSpacing, lineSpacing float64
var numSegments int
var rectangleSize modeling.RectangleSize

if customParams == "yes" {
// Input custom parameters
fmt.Print("Enter dot radius in mm (default 0.9): ")
scanner.Scan()
if val, err := strconv.ParseFloat(scanner.Text(), 64); err == nil {
dotRadius = val
} else {
dotRadius = modeling.DefaultDotRadius
}
}

fmt.Print("Enter dot height in mm (default 0.5): ")
scanner.Scan()
if val, err := strconv.ParseFloat(scanner.Text(), 64); err == nil {
dotHeight = val
} else {
dotHeight = modeling.DefaultDotHeight
}

fmt.Print("Enter symbol spacing in mm (default 6.0): ")
scanner.Scan()
if val, err := strconv.ParseFloat(scanner.Text(), 64); err == nil {

```

```

        symbolSpacing = val
    } else {
        symbolSpacing = modeling.DefaultSymbolSpacing
    }

    fmt.Print("Enter line spacing in mm (default 10.0): ")
    scanner.Scan()
    if val, err := strconv.ParseFloat(scanner.Text(), 64); err == nil {
        lineSpacing = val
    } else {
        lineSpacing = modeling.DefaultLineSpacing
    }

    fmt.Print("Enter number of segments for cylinder approximation (default 20): ")
    scanner.Scan()
    if val, err := strconv.Atoi(scanner.Text()); err == nil {
        numSegments = val
    } else {
        numSegments = modeling.DefaultNumSegments
    }

    fmt.Print("Enter rectangle width in mm (default 100.0): ")
    scanner.Scan()
    if val, err := strconv.ParseFloat(scanner.Text(), 64); err == nil {
        rectangleSize.Width = val
    } else {
        rectangleSize.Width = modeling.DefaultRectangleWidth
    }

    fmt.Print("Enter rectangle height in mm (default 60.0): ")
    scanner.Scan()
    if val, err := strconv.ParseFloat(scanner.Text(), 64); err == nil {
        rectangleSize.Height = val
    } else {
        rectangleSize.Height = modeling.DefaultRectangleHeight
    }

    fmt.Print("Enter rectangle depth in mm (default 1.0): ")
    scanner.Scan()
    if val, err := strconv.ParseFloat(scanner.Text(), 64); err == nil {
        rectangleSize.Depth = val
    } else {
        rectangleSize.Depth = modeling.DefaultRectangleDepth
    }

```

```

}

    } else {
// Use default parameters
dotRadius = modeling.DefaultDotRadius
dotHeight = modeling.DefaultDotHeight
symbolSpacing = modeling.DefaultSymbolSpacing
lineSpacing = modeling.DefaultLineSpacing
numSegments = modeling.DefaultNumSegments
rectangleSize.Width = modeling.DefaultRectangleWidth
rectangleSize.Height = modeling.DefaultRectangleHeight
rectangleSize.Depth = modeling.DefaultRectangleDepth
}

// Step 4: Ask for model file path
fmt.Print("Enter file path to save the 3D model (leave blank to save in the current
directory): ")
    scanner.Scan()
    modelFilePath := scanner.Text()
if modelFilePath == "" {
    currentDir, err := os.Getwd()
if err != nil {
fmt.Println("Error getting current directory:", err)
return
}
    modelFilePath = filepath.Join(currentDir, "braille_model.stl")
}

// Step 5: Ask for dot type
fmt.Print("Do you want the dots to be raised (convex) or recessed (concave)? (enter
'raised' or 'recessed'): ")
    scanner.Scan()
    dotType := strings.ToLower(scanner.Text())
    isConvex := dotType == "raised"

// Generate 3D model
fmt.Printf("Generating Braille model with parameters:\n")
fmt.Printf("Braille text: %s\n", brailleText3D)
fmt.Printf("Save path: %s\n", modelFilePath)
fmt.Printf("Dot radius: %.2f\n", dotRadius)
fmt.Printf("Dot height: %.2f\n", dotHeight)
fmt.Printf("Symbol spacing: %.2f\n", symbolSpacing)

```

```

fmt.Printf("Line spacing: %.2f\n", lineSpacing)
fmt.Printf("Number of segments: %d\n", numSegments)
fmt.Printf("Rectangle size: %.2f x %.2f x %.2f\n", rectangleSize.Width,
rectangleSize.Height, rectangleSize.Depth)
fmt.Printf("Convex dots: %t\n", isConvex)

    err = modeling.GenerateBrailleModel(brailleText3D, modelFilePath, dotRadius,
dotHeight, symbolSpacing, lineSpacing, numSegments, rectangleSize, isConvex)
if err != nil {
fmt.Println("Error generating 3D model:", err)
return
}
fmt.Println("3D model saved to", modelFilePath)

// Step 6: Ask if the user wants to analyze the model
fmt.Print("Would you like to analyze the 3D model? (yes/no): ")
    scanner.Scan()
if strings.ToLower(scanner.Text()) == "yes" {
    stlFilePath, err := analyze.PromptUserForFile()
if err != nil {
fmt.Println(err)
return
}
err = analyze.AnalyzeBrailleModel(stlFilePath)
if err != nil {
fmt.Println("Error analyzing 3D model:", err)
return
}
    } else {
fmt.Println("3D model analysis skipped.")
    }
case "2":
// Run predictive calculator
analyze.RunPredictiveCalculator()
default:
fmt.Println("Invalid choice. Exiting.")
    }
}

```

Частина 2. INPUT

```

11 // DetectLanguageManually determines the language based on the text.
12 func DetectLanguageManually(text string) string { 5 usages ± Nikita Tarasov
13     for _, char := range text {
14         if unicode.Is(unicode.Cyrillic, char) {
15             if isUkrainian(text) {
16                 return "Ukrainian"
17             }
18             return "Russian"
19         }
20     }
21     return "English"
22 }
23
24 // isUkrainian checks for specific Ukrainian characters in the text.
25 func isUkrainian(text string) bool { 2 usages ± Nikita Tarasov
26     ukrainianSpecificChars := "reii"
27     for _, char := range text {
28         if strings.ContainsRune(ukrainianSpecificChars, char) {
29             return true
30         }
31     }
32     return false
33 }
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47 func GetBrailleMapText(lang string) map[rune]string { 1 usage ± Nikita Tarasov *
48     switch lang {
49     case "Ukrainian":
50         return map[rune]string{
51             ' ': "", // Space character
52             'А': "⠠", 'Б': "⠡", 'В': "⠢", 'Г': "⠤", 'Ґ': "⠤",
53             'Д': "⠥", 'Е': "⠦", 'Є': "⠦", 'Ж': "⠨", 'З': "⠩",
54             'И': "⠪", 'І': "⠫", 'Ї': "⠫", 'Й': "⠬", 'К': "⠭",
55             'Л': "⠮", 'М': "⠯", 'Н': "⠰", 'О': "⠱", 'П': "⠲",
56             'Р': "⠳", 'С': "⠴", 'Т': "⠵", 'У': "⠶", 'Ф': "⠷",
57             'Х': "⠸", 'Ц': "⠹", 'Ч': "⠺", 'Ш': "⠻", 'Щ': "⠼",
58             'Ь': "⠽", 'Ю': "⠿", 'Я': "⠿",
59             '1': "⠠", '2': "⠠", '3': "⠠", '4': "⠠", '5': "⠠",
60             '6': "⠠", '7': "⠠", '8': "⠠", '9': "⠠", '0': "⠠",
61             ',': "⠠", '(': "⠠", '?': "⠠", '!': "⠠", '-': "⠠",
62             '(': "⠠", ')': "⠠", '/': "⠠", ':': "⠠", ':': "⠠",
63             '"': "⠠", '\': "⠠",
64         }
65     default: // English
66         return map[rune]string{
67             ' ': "", // Space character
68             'A': "⠠", 'B': "⠡", 'C': "⠢", 'D': "⠤", 'E': "⠥",
69             'F': "⠦", 'G': "⠦", 'H': "⠨", 'I': "⠪", 'J': "⠫",
70             'K': "⠭", 'L': "⠮", 'M': "⠯", 'N': "⠰", 'O': "⠱",
71             'P': "⠳", 'Q': "⠳", 'R': "⠵", 'S': "⠴", 'T': "⠵",
72             'U': "⠶", 'V': "⠷", 'W': "⠷", 'X': "⠸", 'Y': "⠸", 'Z': "⠸",

```

Частина 2. OUTPUT

```

118
119 func GetBrailleMappings(lang string) map[rune]string { 3 usages  Nikita Tarasov *
120     switch lang {
121     case "Ukrainian":
122         return map[rune]string{
123             ' ': "000000", // Space character
124             'А': "100000", 'Б': "101000", 'В': "100100", 'Г': "100110", 'Ґ': "100010",
125             'Д': "100001", 'Е': "100001", 'Є': "110100", 'Ж': "110110", 'З': "110010",
126             'И': "111010", 'І': "101000", 'Ї': "101000", 'Й': "111010", 'К': "101000",
127             'Л': "111000", 'М': "101100", 'Н': "101110", 'О': "101010", 'П': "111100",
128             'Р': "111110", 'С': "111010", 'Т': "111110", 'У': "101001", 'Ф': "111001",
129             'Х': "011101", 'Ц': "011110", 'Ч': "011100", 'Ш': "011101", 'Щ': "011101",
130             'Ь': "011010", 'Ю': "001011", 'Я': "001011",
131             '1': "100000", '2': "101000", '3': "100100", '4': "100110", '5': "100010",
132             '6': "110100", '7': "110110", '8': "110010", '9': "011100", '0': "011110",
133             ',': "001000", '(': "010011", '?': "001011", ';': "001010", ':': "010010",
134             '-': "001001", '\': "001000", '"': "001000", '!': "011010", '@': "000000",
135             '#': "010010", '$': "001010", '%': "011010", '&': "101000", '*': "001010",
136             '+': "011011", '=': "001010", '(': "101010", ')': "101010", '/': "101100",
137             '\\': "101110", '[': "011101", ']': "011101", '{': "011101", '}': "011101",
138             '|': "011010", '^': "000001", '_': "001000", '~': "001001",
139         }
140     case "Russian":
141         return map[rune]string{
142             ' ': "000000", // Space character
143             'А': "100000", 'Б': "101000", 'В': "100100", 'Г': "100110", 'Д': "100010",
144             'Е': "100001", 'Ё': "100001", 'Ж': "110100", 'З': "110110", 'И': "110010",

```

Частина 2. SAVE AS

```

265 func SaveBrailleToTextFile(filename, originalText, brailleText string) error { 2 usages  1 ^
266     finalPath := GetUniqueFileName(filename)
267     formattedText := FormatBrailleText(originalText, brailleText)
268     file, err := os.Create(finalPath)
269     if err != nil {
270         return err
271     }
272     defer file.Close()
273
274     _, err = file.WriteString(formattedText)
275     return err
276 }
277
278 func GetUniqueFileName(filePath string) string { 1 usage  Nikita Tarasov
279     ext := filepath.Ext(filePath)
280     base := filePath[:len(filePath)-len(ext)]
281     counter := 1
282
283     for {
284         if _, err := os.Stat(filePath); os.IsNotExist(err) {
285             break
286         }
287         filePath = fmt.Sprintf(format: "%s(%d)%s", base, counter, ext)
288         counter++
289     }
290
291     return filePath
292 }

```

Частина 3. Генерування 3D-моделі

```

const (
    DefaultDotRadius      = 0.8 // mm
    DefaultDotHeight      = 0.5 // mm
    DefaultSymbolSpacing  = 3.0 // mm
    DefaultLineSpacing    = 5.0 // mm
    BrailleGridWidth      = 2.4 // mm
    BrailleGridHeight     = 2.4 // mm
    CellWidth              = 6.0 // mm
    DefaultRectanglePadding = 5.0 // mm
    DefaultRectangleDepth  = 1.0 // mm
    DefaultRectangleWidth  = 100.0 // mm
    DefaultRectangleHeight = 60.0 // mm
    DefaultNumSegments     = 20
)

// RectangleSize holds dimensions of the rectangle
type RectangleSize struct {
    Width float64
    Height float64
    Depth float64
}

type BrailleSymbol struct {
    dots [6]bool // Array from points (true – yes for point, false -not point)
    char rune
    points [6]bool
}

// getUniqueFilename creates a unique filename if a file already exists
func getUniqueFilename(baseName, extension string) string {
    if _, err := os.Stat(baseName + extension); os.IsNotExist(err) {
        return baseName + extension
    }

    counter := 1
    for {
        newFileName := fmt.Sprintf("%s(%d)%s", baseName, counter, extension)
        if _, err := os.Stat(newFileName); os.IsNotExist(err) {

```

```

return newFileName
    }
    counter++
}
}

func GenerateBrailleModel(brailleText, outputPath string, dotRadius, dotHeight,
symbolSpacing, lineSpacing float64, numSegments int, rectangleSize RectangleSize,
isConvex bool) error {
fmt.Println("Generating Braille model")
fmt.Printf("Generating Braille model with parameters:\n")
fmt.Printf("Braille text: %s\n", brailleText)
fmt.Printf("Dot radius: %.2f\n", dotRadius)
fmt.Printf("Dot height: %.2f\n", dotHeight)
fmt.Printf("Symbol spacing: %.2f\n", symbolSpacing)
fmt.Printf("Line spacing: %.2f\n", lineSpacing)
fmt.Printf("Number of segments: %d\n", numSegments)
fmt.Printf("Rectangle size: %.2f x %.2f x %.2f\n", rectangleSize.Width,
rectangleSize.Height, rectangleSize.Depth)
fmt.Printf("Convex dots: %t\n", isConvex)
fmt.Printf("Save path: %s\n", outputPath)

    outputPath = getUniqueFilename(strings.TrimSuffix(outputPath, ".stl"), ".stl")

    solid := stl.Solid{Name: "BrailleModel"}
addRectangleBaseToSolid(&solid, rectangleSize.Width, rectangleSize.Height,
rectangleSize.Depth)

    startX := DefaultRectanglePadding
startY := rectangleSize.Height - DefaultRectanglePadding

symbols := convertTextToBraille(brailleText)

for _, symbol := range symbols {
fmt.Printf("Processing symbol: %c, dots: %v\n", symbol.char, symbol.dots)
// Define the positions of the 6 dots in the Braille cell
positions := [][]float64{
    {startX, startY}, // Dot 1 (upper left)
    {startX, startY - BrailleGridHeight}, // Dot 2 (middle left)
    {startX, startY - 2*BrailleGridHeight}, // Dot 3 (lower left)
    {startX + BrailleGridWidth, startY}, // Dot 4 (upper right)
    {startX + BrailleGridWidth, startY - BrailleGridHeight}, // Dot 5 (middle right)
    {startX + BrailleGridWidth, startY - 2*BrailleGridHeight}, // Dot 6 (lower right)
}

```

```

}

// Add cylinders for each dot in the symbol
for i, pos := range positions {
if symbol.dots[i] {
if isConvex {
addCylinderToSolid(&solid, pos[0], pos[1], rectangleSize.Depth,
    dotRadius, dotHeight, numSegments, true)
    } else {
addRecessedCylinderToSolid(&solid, pos[0], pos[1], rectangleSize.Depth,
    dotRadius, dotHeight, numSegments)
    }
    }
    }

// Move to the next symbol position
startX += CellWidth + symbolSpacing

// Move to the next line if the current line is full
if startX+CellWidth > rectangleSize.Width-DefaultRectanglePadding {
    startX = DefaultRectanglePadding
startY -= 3*BrailleGridHeight + lineSpacing
    }
    }

    // Save STL file
fileOutput, err := os.Create(outputPath)
if err != nil {
return fmt.Errorf("error creating file: %w", err)
    }
defer fileOutput.Close()

    err = solid.WriteAll(fileOutput)
if err != nil {
return fmt.Errorf("error writing STL file: %w", err)
    }

fmt.Printf("3D model saved to %s\n", outputPath)
return nil
}

// Adds a solid rectangular base to the STL solid

```

```

func addRectangleBaseToSolid(solid *stl.Solid, width, height, thickness float64) {
// Bottom face
v1 := stl.Vec3{0, 0, 0}
v2 := stl.Vec3{float32(width), 0, 0}
v3 := stl.Vec3{float32(width), float32(height), 0}
v4 := stl.Vec3{0, float32(height), 0}
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v1, v2, v3}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v1, v3, v4}})

// Top face
v5 := stl.Vec3{0, 0, float32(thickness)}
v6 := stl.Vec3{float32(width), 0, float32(thickness)}
v7 := stl.Vec3{float32(width), float32(height), float32(thickness)}
v8 := stl.Vec3{0, float32(height), float32(thickness)}
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v5, v6, v7}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v5, v7, v8}})

// Side faces
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v1, v2, v6}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v1, v6, v5}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v2, v3, v7}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v2, v7, v6}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v3, v4, v8}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v3, v8, v7}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v4, v1, v5}})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{Vertices: [3]stl.Vec3{v4, v5, v8}})
}

// Adds a cylinder to the STL solid
func addCylinderToSolid(solid *stl.Solid, x, y, z, radius, height float64, numSegments
int, isConvex bool) {
    thetaStep := 2.0 * math.Pi / float64(numSegments)
    for i := 0; i < numSegments; i++ {
        theta1 := float64(i) * thetaStep
        theta2 := float64(i+1) * thetaStep

        x1 := x + radius*math.Cos(theta1)
        y1 := y + radius*math.Sin(theta1)
        x2 := x + radius*math.Cos(theta2)
        y2 := y + radius*math.Sin(theta2)

// If the dot is concave, height is negative

```

```

finalHeight := height
if !isConvex {
    finalHeight = -height
}

// Bottom face
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{
    Vertices: [3]stl.Vec3{
        {float32(x), float32(y), float32(z)},
        {float32(x1), float32(y1), float32(z)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z)},
    },
})

// Top face
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{
    Vertices: [3]stl.Vec3{
        {float32(x), float32(y), float32(z + finalHeight)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z + finalHeight)},
        {float32(x1), float32(y1), float32(z + finalHeight)},
    },
})

// Side faces
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{
    Vertices: [3]stl.Vec3{
        {float32(x1), float32(y1), float32(z)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z + finalHeight)},
    },
})
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{
    Vertices: [3]stl.Vec3{
        {float32(x1), float32(y1), float32(z)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z + finalHeight)},
        {float32(x1), float32(y1), float32(z + finalHeight)},
    },
})
}
}

// Adds a recessed cylinder to the STL solid

```

```

func addRecessedCylinderToSolid(solid *stl.Solid, x, y, z, radius, height float64,
numSegments int) {
    thetaStep := 2.0 * math.Pi / float64(numSegments)
    for i := 0; i < numSegments; i++ {
        theta1 := float64(i) * thetaStep
        theta2 := float64(i+1) * thetaStep

        x1 := x + radius*math.Cos(theta1)
        y1 := y + radius*math.Sin(theta1)
        x2 := x + radius*math.Cos(theta2)
        y2 := y + radius*math.Sin(theta2)

// Bottom face of the recessed cylinder
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{
    Vertices: [3]stl.Vec3{
        {float32(x), float32(y), float32(z)},
        {float32(x1), float32(y1), float32(z)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z)},
    },
})

// Top face of the recessed cylinder
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{
    Vertices: [3]stl.Vec3{
        {float32(x1), float32(y1), float32(z + height)},
        {float32(x), float32(y), float32(z + height)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z + height)},
    },
})

// Side faces of the recessed cylinder
solid.AppendTriangle(stl.Triangle{
    Vertices: [3]stl.Vec3{
        {float32(x1), float32(y1), float32(z)},
        {float32(x1), float32(y1), float32(z + height)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z + height)},
    },
})

solid.AppendTriangle(stl.Triangle{
    Vertices: [3]stl.Vec3{
        {float32(x1), float32(y1), float32(z)},

```

```

        {float32(x2), float32(y2), float32(z + height)},
        {float32(x2), float32(y2), float32(z)},
    },
})
}
}

// Converts text to Braille symbols
func convertTextToBraille(text string) []BrailleSymbol {
var symbols []BrailleSymbol
text = strings.ToUpper(text)

    lang := braille.DetectLanguageManually(text)
    brailleMappings := braille.GetBrailleMappings(lang)

for _, char := range text {
if pattern, exists := brailleMappings[char]; exists {
    symbol := parseBraillePattern(pattern)
    symbol.char = char
    symbols = append(symbols, symbol)
}
}
return symbols
}

// Parses the Braille pattern string into BrailleSymbol
func parseBraillePattern(pattern string) BrailleSymbol {
var symbol BrailleSymbol
for i := 0; i < len(pattern) && i < 6; i++ {
// Bits correspond directly to dots 1-6
symbol.dots[i] = pattern[i] == '1'
}
return symbol
}

```

Частина 4.

Аналізатор 3D-моделей

```
// PromptUserForFile prompts the user to enter the file path of the STL file or uses the
// default file if user says "yes"
func PromptUserForFile() (string, error) {
    reader := bufio.NewReader(os.Stdin)
    fmt.Print("Do you want to analyze the default STL file in the current directory?
    (yes/no): ")
    input, _ := reader.ReadString('\n')
    input = strings.TrimSpace(input)

    if strings.ToLower(input) == "yes" {
        // Use the default file in the current directory
        defaultFile := "./braille_model.stl"
        if _, err := os.Stat(defaultFile); os.IsNotExist(err) {
            return "", fmt.Errorf("default file does not exist in the current directory")
        }
        return defaultFile, nil
    }

    fmt.Print("Please enter the path of the STL file for analysis: ")
    stlFilePath, _ := reader.ReadString('\n')
    stlFilePath = strings.TrimSpace(stlFilePath)

    if _, err := os.Stat(stlFilePath); os.IsNotExist(err) {
        return "", fmt.Errorf("file does not exist: %s", stlFilePath)
    }
    return stlFilePath, nil
}

func AnalyzeBrailleModel(stlFilePath string) error {
    file, err := os.Open(stlFilePath)
    if err != nil {
        return fmt.Errorf("failed to open STL file: %v", err)
    }
    defer file.Close()

    solid, err := stl.ReadFile(stlFilePath)
    if err != nil {
        return fmt.Errorf("error reading STL file: %v", err)
    }
}
```

```

    }

    var lastX, lastY float64
    firstPoint := true
    for _, triangle := range solid.Triangles {
        x := (float64(triangle.Vertices[0][0]) + float64(triangle.Vertices[1][0]) +
float64(triangle.Vertices[2][0])) / 3
        y := (float64(triangle.Vertices[0][1]) + float64(triangle.Vertices[1][1]) +
float64(triangle.Vertices[2][1])) / 3
        z := (float64(triangle.Vertices[0][2]) + float64(triangle.Vertices[1][2]) +
float64(triangle.Vertices[2][2])) / 3

        radius := math.Sqrt(x*x + y*y)
        if math.Abs(radius-expectedDotRadius) > tolerance {
            return fmt.Errorf("error: Point radius (%.2f mm) is not as expected (%.2f mm)", radius,
expectedDotRadius)
        }

        if z > expectedDotHeight + tolerance {
            return fmt.Errorf("error: Dot height (%.2f mm) is above the expected height (raised
dot)", z)
        } else if z < expectedDotHeight - tolerance {
            return fmt.Errorf("error: Dot height (%.2f mm) is below the expected height (recessed
dot)", z)
        }
        fmt.Println("Warning: The dot seems to be recessed (%.2f mm).", z)
    }

    if !firstPoint {
        interval := math.Sqrt(math.Pow(x-lastX, 2) + math.Pow(y-lastY, 2))
        if math.Abs(interval-expectedSymbolSpacing) > tolerance {
            return fmt.Errorf("error: The interval between dots (%.2f mm) is not as expected (%.2f
mm)", interval, expectedSymbolSpacing)
        }
    }

    lastX, lastY = x, y
    firstPoint = false
}

fmt.Println("Analysis successful. The model complies with Braille standards.")
return nil
}

```

Калькулятор прогнозування

```
// Define a struct for fuzzy parameters
type FuzzyValues struct {
    low    float64
    medium float64
    high   float64
}

// Calculate fuzzy score based on low, medium, and high parameters
func calculateFuzzyScore(values FuzzyValues, input float64) float64 {
    if input < 0 {
        return values.low
    } else if input > 1 {
        return values.high
    }
    return values.low*(1-input) + values.medium*input*0.5 + values.high*input
}

// Predict quality level based on overall score
func predictQualityLevel(quality float64) string {
    if quality >= 0.7 {
        return "High"
    } else if quality >= 0.4 {
        return "Medium"
    }
    return "Low"
}

// Get user input with error handling
func GetUserInput(prompt string, options []string) int {
    var choice int
    for {
        fmt.Println(prompt)
        for i, option := range options {
            fmt.Printf("%d. %s\n", i+1, option)
        }
        fmt.Print("Enter your choice: ")
        input, err := bufio.NewReader(os.Stdin).ReadString("\n")
        if err != nil {
            fmt.Println("Error reading input. Please try again.")
            continue
        }
    }
}
```

```

}
    input = strings.TrimSpace(input)
    choice, err = strconv.Atoi(input)
    if err != nil || choice < 1 || choice > len(options) {
    fmt.Println("Invalid input. Please enter a valid number.")
    continue
    }
    break
}
return choice
}

// Get parameter input with validation and warnings
func getParameterInput(prompt string, min, max, defaultMax float64) float64 {
var value float64
for {
    fmt.Printf("%s (%.2f - %.2f): ", prompt, min, max)
    input, err := bufio.NewReader(os.Stdin).ReadString('\n')
    if err != nil {
    fmt.Println("Error reading input. Please try again.")
    continue
    }
    input = strings.TrimSpace(input)
    value, err = strconv.ParseFloat(input, 64)
    if err != nil || value < min {
    fmt.Println("Invalid input. Please enter a valid value.")
    continue
    }
    if value > max {
    fmt.Printf("Warning: The value %.2f exceeds the standard range. Do you want to
    continue? (yes/no): ", value)
    confirm, _ := bufio.NewReader(os.Stdin).ReadString('\n')
    if strings.TrimSpace(strings.ToLower(confirm)) != "yes" {
    continue
    }
    }
    break
}
return value
}

// Parse grid size input (e.g., 2x3)

```

```

func parseGridSize(input string) (int, int, error) {
    parts := strings.Split(input, "x")
    if len(parts) != 2 {
        return 0, 0, fmt.Errorf("invalid format")
    }
    rows, err1 := strconv.Atoi(strings.TrimSpace(parts[0]))
    cols, err2 := strconv.Atoi(strings.TrimSpace(parts[1]))
    if err1 != nil || err2 != nil {
        return 0, 0, fmt.Errorf("invalid format")
    }
    return rows, cols, nil
}

// RunPredictiveCalculator encapsulates the predictive calculator logic
func RunPredictiveCalculator() {
    // Available 3D printing technologies
    technologies := []string{"SLA-DLP", "PolyJet", "SLS", "FDM-FFF"}
    materials := map[string][]string{
        "SLA-DLP": {"Standard Resin", "Flexible Resin", "Clear Resin"},
        "PolyJet": {"High-Resolution Material", "Elastic Material", "Transparent Material"},
        "SLS":     {"PA12", "PA11", "PA6"},
        "FDM-FFF": {"PLA", "ABS", "TPU"},
    }
    fontTypes := []string{"Braille-3D Font", "Braille Embossing Font", "Braille Standard Font"}

    // Fuzzy values for each parameter
    fuzzyValues := map[string]FuzzyValues{
        "temperature": {low: 0.2, medium: 0.6, high: 0.8},
        "braille_grid": {low: 0.3, medium: 0.6, high: 0.9},
        "braille_cell": {low: 0.25, medium: 0.65, high: 0.85},
        "dot_height":   {low: 0.2, medium: 0.55, high: 0.8},
        "dot_diameter": {low: 0.3, medium: 0.7, high: 0.9},
        "dot_spacing":  {low: 0.35, medium: 0.65, high: 0.85},
        "cell_spacing": {low: 0.25, medium: 0.6, high: 0.85},
        "grid_size":    {low: 0.3, medium: 0.65, high: 0.85},
    }

    // User input
    technologyIndex := GetUserInput("Choose a 3D printing technology:", technologies)
    technology := technologies[technologyIndex-1]

```

```

    materialIndex := GetUserInput(fmt.Sprintf("Choose a material for %s:", technology),
materials[technology])
    material := materials[technology][materialIndex-1]

    brailleText := ""
fmt.Print("Enter the Braille text you want to print: ")
    reader := bufio.NewReader(os.Stdin)
    brailleText, _ = reader.ReadString('\n')
    brailleText = strings.TrimSpace(brailleText)

    fontIndex := GetUserInput("Choose a Braille font:", fontTypes)
    fontType := fontTypes[fontIndex-1]

// Parameters
fmt.Println("Enter the following parameters:")
    temperature := getParameterInput("Temperature (°C)", 20, 300, 300)
fmt.Print("Enter Braille grid size (e.g., 2x3): ")
    gridInput, _ := reader.ReadString('\n')
    gridInput = strings.TrimSpace(gridInput)
    rows, cols, err := parseGridSize(gridInput)
if err != nil {
fmt.Println("Invalid grid size. Please enter in format NxM (e.g., 2x3).")
os.Exit(1)
}

    brailleCell := getParameterInput("Braille cell size (mm)", 1, 5, 5)
    dotHeight := getParameterInput("Dot height (mm)", 0.1, 1.0, 1.0)
    dotDiameter := getParameterInput("Dot diameter (mm)", 0.8, 2.0, 2.0)
    dotSpacing := getParameterInput("Spacing between dots (mm)", 0.5, 2.5, 2.5)
    cellSpacing := getParameterInput("Spacing between cells (mm)", 2.0, 5.0, 5.0)
    gridSize := getParameterInput("Grid size (mm)", 2.0, 4.5, 4.5)

// Normalize inputs to fuzzy ranges (0-1)
temperatureNorm := (temperature - 20) / (300 - 20)
    brailleGridNorm := float64(rows*cols) / 100.0
brailleCellNorm := (brailleCell - 1) / (5 - 1)
    dotHeightNorm := (dotHeight - 0.1) / (1.0 - 0.1)
    dotDiameterNorm := (dotDiameter - 0.8) / (2.0 - 0.8)
    dotSpacingNorm := (dotSpacing - 0.5) / (2.5 - 0.5)
    cellSpacingNorm := (cellSpacing - 2.0) / (5.0 - 2.0)
    gridSizeNorm := (gridSize - 2.0) / (4.5 - 2.0)

```

```

// Calculate quality for each parameter
quality := map[string]float64{
    "temperature": calculateFuzzyScore(fuzzyValues["temperature"], temperatureNorm),
    "braille_grid": calculateFuzzyScore(fuzzyValues["braille_grid"], brailleGridNorm),
    "braille_cell": calculateFuzzyScore(fuzzyValues["braille_cell"], brailleCellNorm),
    "dot_height": calculateFuzzyScore(fuzzyValues["dot_height"], dotHeightNorm),
    "dot_diameter": calculateFuzzyScore(fuzzyValues["dot_diameter"], dotDiameterNorm),
    "dot_spacing": calculateFuzzyScore(fuzzyValues["dot_spacing"], dotSpacingNorm),
    "cell_spacing": calculateFuzzyScore(fuzzyValues["cell_spacing"], cellSpacingNorm),
    "grid_size": calculateFuzzyScore(fuzzyValues["grid_size"], gridSizeNorm),
}

// Calculate overall quality
var totalQuality float64
for _, v := range quality {
    totalQuality += v
}
overallQuality := totalQuality / float64(len(quality)) * 100

// Determine quality level
qualityLevel := predictQualityLevel(overallQuality / 100)

// Results
fmt.Println("\n--- Results ---")
fmt.Printf("Braille Text: %s\n", brailleText)
fmt.Printf("Material: %s\n", material)

```

ПРОГРАМНИЙ КОД ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ РЕЙТИНГУ ФАКТОРІВ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ELO.

```
import numpy as np

comparison_matrix = np.array([
    [1, 3, 1/2, 1/4, 1/5, 7],
    [1/3, 1, 1/4, 1/5, 1/6, 6],
    [2, 4, 1, 1/3, 1/4, 5],
    [4, 5, 2, 1, 1/3, 3],
    [5, 6, 4, 3, 1, 2],
    [1/7, 1/6, 1/5, 1/3, 1/2, 1]
])

initial_ratings = np.full(6, 1000)
K = 32

def expected_score(rating1, rating2):
    return 1 / (1 + 10 ** ((rating2 - rating1) / 400))

def update_ratings(comparison_matrix, initial_ratings, K):
    ratings = initial_ratings.copy()
    num_factors = len(ratings)

    for i in range(num_factors):
        for j in range(num_factors):
            if i != j:
                score_i = comparison_matrix[i, j]
                expected_i = expected_score(ratings[i], ratings[j])
                ratings[i] = ratings[i] + K * (score_i - expected_i)

    return ratings

updated_ratings = update_ratings(comparison_matrix, initial_ratings, K)

factors = [
    "3D-modeling software",
    "Braille text complexity",
    "3D printing type",
```

```
"3D printing materials",  
"Slicer",  
"Braille cell and grid sizes"  
]  
  
ranked_factors = sorted(zip(factors, updated_ratings), key=lambda x: x[1],  
reverse=True)  
  
for rank, (factor, rating) in enumerate(ranked_factors, start=1):  
    print(f"{factor} ( {rating:.2f} ) - Rank {rank}")
```

Додаток Ж.

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Проректор з науково-педагогічної роботи

Української академії друкарства



Угрин Я.М.

2024 р.

Д О В І Д К А

про використання матеріалів дисертації Тарасова Н. А.

**«Інформаційна технологія формування шрифту Брайля за допомогою
3d-моделювання»**

в освітньому процесі Української академії друкарства

Підготовка спеціалістів в Українській академії друкарства орієнтована на сучасний стан поліграфії та видавничої справи і запровадження прогресивних інформаційних технологій. В дисциплінах комп'ютерного циклу використовуються видавничі системи для опрацювання і верстання тексту та ілюстрацій, пакети керування базами даних, засоби організації електронних мультимедійних видань.

Одні з основних дисциплін навчального плану передбачають комп'ютеризацію та моделювання процесів комп'ютерного опрацювання текстової та графічної інформації для випуску електронних мультимедійних видань, в тому числі побудову, дослідження та удосконалення моделей інформаційної технології проектування електронних мультимедійних видань під певні типи призначень, в тому числі для інклюзивної освіти. Це знайшло відображення в робочих навчальних програмах і методичних посібниках для лекційних та практичних курсах студентів освітнього

ступеня «бакалавр» і «магістр» спеціальності «Видавництво та поліграфія» освітньо-професійної програми «Технологія електронних мультимедійних видань», а саме такі дисципліни як «Організація веборієнтованих баз даних», «Електронний документообіг», «Технологія електронних мультимедійних видань», «Управління мультимедійним проєктом» на кафедрі інформаційних мультимедійних технологій Української академії друкарства.

Під час вивчення перерахованих вище дисциплін використовуються алгоритми, моделі та методи, побудова, дослідження і реалізація яких здійснені у дисертаційній роботі Тарасова Н. А. «Інформаційна технологія формування шрифту Брайля за допомогою 3d-моделювання». Основні серед них: ієрархічно структуровані, упорядковані за ваговими коефіцієнтами та оптимізовані графічні моделі вагових значень та пріоритетного впливу факторів на якість створення та запровадження інформаційної технології формування шрифту Брайля, які є основою створення інформаційної системи для формування шрифту Брайля; конвертування вихідного файлу в різні формати; залучення штучного інтелекту; підтримки інформаційного забезпечення.

Матеріали дисертації використовуються під час визначення тем та змісту кваліфікаційних робіт студентів технологічних спеціальностей.

Завідувач кафедри інформаційних
мультимедійних технологій
д.т.н., професор



В. І. Сабат

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор комунального закладу

Львівської обласної ради

«Навчально-реабілітаційний центр «Левеня»



Мирослава СТЕПАНЮК

10.03.2025**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

результатів дисертаційної роботи «Інформаційна технологія формування
шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання» аспіранта

Тарасова Нікіти Андрійовича

Ми, представники навчально-реабілітаційного центру «Левеня» в особі, заступник директора з адміністративно-господарської роботи НРЦ «Левеня», канд. тех. наук Мар'ян ХАРІВ, вчитель початкових класів, вчитель-дефектолог НРЦ «Левеня» Валентина ПЛОНКА даним Актом стверджуємо впровадження і використання в процесі створенні тактильних 3D-моделей з формуванням шрифту Брайля рекомендації та технологічні особливості у створенні таких моделей за допомогою 3D-моделювання та використанням адитивних технологій 3D-друку, а також перспективи інтегрування штучного інтелекту у створенні тактильних моделей, що є результатом дисертаційної роботи Нікіти ТАРАСОВА на тему «Інформаційна технологія формування шрифту Брайля за допомогою 3D-моделювання».

Комунальним закладом проведено дослідження можливості використання та рекомендації технології щодо створення тактильних 3D-моделей з використанням сучасних технологій адитивного виробництва та 3D-моделювання, а також взято до уваги фактори, які впливають на якість формування шрифту Брайля за даною технологією.

Розроблені дисертантом моделі, методи, алгоритми та рекомендації дають можливість забезпечувати високу якість у створенні тактильних моделей за допомогою технологій 3D-моделювання, тим самим покращуючи якість інклюзивного середовища для незрячих людей.

Впроваджені моделі, алгоритми, технології та рекомендації, що є науковим результатом дисертаційної роботи Тарасова Нікіти Андрійовича рекомендовано використовувати для забезпечення якості інклюзивного середовища для незрячих людей.

Заступник директора з АГР,
канд. тех. наук



Мар'ян ХАРІВ

Вчитель початкових класів,
вчитель-дефектолог



Валентина ПЛОНКА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор комунального закладу

Львівської обласної ради

«Навчально-реабілітаційний центр «Левеня»



Мирослава СТЕПАНЮК

10.03.2025**АКТ**

випробувань комп'ютерної програми «3D Braille CAD» для генерацію тексту в текст шрифтом Брайля та перетворення в 3D-модель з відповідними параметрами, а також проведення аналізу на відповідність стандартів щодо тексту Брайля на 3D-моделі, а також прогностичного оцінювання якості майбутньої 3D-моделі при виборі різних технологій 3D-друку та параметрів і тексту Брайля

Ми, що нижче підписалися, заступник директора з адміністративно-господарської роботи НРЦ «Левеня», канд. тех. наук Мар'ян ХАРІВ, вчитель початкових класів, вчитель-дефектолог НРЦ «Левеня» Валентина ПЛОНКА з однієї сторони, завідувач кафедри мультимедійних технологій НУ «ЛП», канд. тех. наук., професор Орест ХАМУЛА, аспірант Національного університету «Львівська Політехніка» Нікіта ТАРАСОВ, з іншої сторони, склали цей акт про те, що нами було: апробована комп'ютерна програма «3D Braille CAD» для генерації тексту в текст шрифтом Брайля та перетворення в 3D-модель з відповідними параметрами; проведено аналіз на відповідність стандартів щодо тексту Брайля на 3D-моделі; прогностичне оцінювання якості майбутньої 3D-моделі при виборі різних технологій 3D-друку та параметрів і тексту Брайля.

Програма перетворює введений текст користувачем на різних мовах в текст Брайля, з можливістю зберігати у файлі форматом TXT, а також створювати стандартну прямокутну 3D-модель з текстом Брайля на моделі, з встановленням різних значень для різних параметрів та зберігати у STL форматі файлу, а також виконувати аналіз цифрової 3D-моделі з текстом Брайля на відповідність до стандартів, а саме: розміри крапок, пробіли і т.п. А також виконувати прогностичне оцінювання якості майбутньої 3D-моделі обираючи різні параметри (тип 3D-друку, текст, параметри 3D-принтера, розміри та тип крапок і т.п.)

Комп'ютерну програму «3D Braille CAD» можна рекомендувати для використання при підготовці до друку тривимірних моделей та навчальних прототипів для осіб з порушеннями зору.

Представники Національного
університету «Львівська
Політехніка»

Завідувач кафедри МТ ІПМТ,
канд. тех. наук., професор

 Орест ХАМУЛА

Аспірант

 Нікіта ТАРАСОВ

Представники НРЦ «Левеня»

Заступник директора з АГР,

канд. тех. наук

 Мар'ян ХАРІВ

Вчитель початкових класів,

вчитель-дефектолог

 Валентина ПЛОНКА