

Математичний метод оцінки ефективності технологічного процесу на базі вібраційного і віброударного обладнання

Ярослав Іванчук
кафедра комп'ютерних наук
Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна
ivanchuck@ukr.net

Mathematical Method for Evaluating the Effectiveness of the Process on the Basis of Vibration and Vibro-impact Equipment

Yaroslav Ivanchuk
dept. of Computer Science
Vinnytsia National Technical University
Vinnytsia, Ukraine
ivanchuck@ukr.net

Анотація—Визначено високу ефективність технологічного процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів за допомогою вібраційної і віброударної обробки. Висока ступінь інтенсифікації процесу ущільнення заготовки досягається застосуванням оригінальних інерційних вібропрес-молотів з гідроімпульсним приводом. Розглянутий системний підхід до технологічного процесу формоутворення (процес, машина, заготовка) і складені множини конструктивних параметрів технологічного обладнання дозволило створити математичну модель визначення середньої щільності заготовки. За критерій оцінки ефективності функціонування технологічного процесу формоутворення заготовок було обрано екстремум масиву значень функцій належності, як визначник повноти і дієвості. На основі нечітких множин була виконана оцінка ефективності функціонування технологічного комплексу. Визначені зв'язки між параметрами середньої щільності заготовки і функції режиму віброударного навантаження заготовки. Проведений аналіз технологічних параметрів заготовок засвідчив адекватність розробленого комплексного математичного апарату для оцінювання динамічної зміни середньої щільності та нерівнощільності отриманих виробів. Встановлено доцільність часового обмеження формування кінцевого виробу віброударним способом пресування для збереження якості. Розробка перспективного методу оцінки стану виробничого комплексу на базі вібропресового

обладнання з гідроімпульсним приводом дозволить підвищити ефективність його технологічного процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів.

Abstract— High efficiency of the technological process of shaping workpieces from powder materials using vibratory and vibro-impact treatments was defined. High degree of intensification of the process of workpiece sealing is achieved using original inertial vibration press-hammers with hydropulse drive. The explored systematic approach to technological process of shaping (process, machine, and workpiece) and sets of design parameters of technological equipment allowed us to create a mathematical model of determining average density of a workpiece. Extremum of array of values of membership function as a determinant of completeness and effectiveness, was selected as the criterion of estimation of functioning efficiency of technological process of shaping workpieces. Assessment of efficiency of functioning of technological complex was made based on fuzzy sets. Relationships between parameters of average density of a workpiece and function of the mode of vibroimpact loading of a workpiece were defined. Performed analysis of technological parameters of workpieces demonstrated adequacy of the developed complex mathematical apparatus for evaluation of dynamic changes in average density and uneven density of derived products. Expediency of time restriction of shaping a final product by vibroimpact pressing method for quality maintaining was established. Development of a promising method of evaluation of production complex condition

based on vibropress equipment with hydropulse drive will allow an increase in efficiency of the technological process of shaping workpieces from powder materials.

Ключові слова—*нечіткі множини, формоутворення, рівнощільність, гідроімпульсний привод, вібропресове обладнання, порошковий матеріал.*

Keywords—*fuzzy sets, shaping, equal density, hydropulse drive, vibropress equipment, powder material.*

I. ВСТУП

Технології, які характеризуються процесами формоутворення заготовок, в яких реалізується текучість матеріалів із складною реологією в умовах складного навантаження, потребують нових розробок, вивчення та вдосконалення. Широке використання знаходять вібраційні та віброударні технологічні процеси, а також обладнання для їх реалізації [1–3]. Встановлено, що прикладання до об'єктів обробки корисних вібрацій або ударних імпульсів дозволяє значно інтенсифікувати протікання ряду технологічних процесів, забезпечити оптимальність параметрів навантаження і одержати виріб з високими якісними параметрами. Зокрема, при пресуванні заготовок виробу з порошкових матеріалів (карбідів, боридів тощо) середня щільність і рівнощільність по об'єму заготовок збільшується на 60–70 % в умовах безвідходного виробництва. Тому до вібраційного обладнання для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів висуваються підвищені вимоги. Воно повинно мати порівняно просту конструкцію, високу надійність, низькі металоємність і енергоємність та забезпечувати якість формованого виробу.

Метою роботи є підвищення ефективності технологічних процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів, за допомогою розробки перспективних математичних моделей вібропресового обладнання з гідроімпульсним приводом.

II. ВИКЛАДЕННЯ МАТЕРІАЛУ

Для реалізації віброударного пресування (ВУП) порошкових матеріалів застосовується спеціальне обладнання. Це обумовлено різними варіантами рекомендованих схем навантаження заготовки при обробці, і різноманіттям типів приводів механізмів генерування вібрацій, чи вібробудувачів. Перспективним є застосування інерційних вібропрес-молотів (ІВПМ) з гідроімпульсним приводом (ГІП), що обумовлене простотою конструкції, компактністю, високою енергоємністю, широким діапазоном регулювання робочих параметрів та можливістю роботи в автоматизованому режимі.

II.1. СИСТЕМОТЕХНІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

У Вінницькому національному технічному університеті на замовлення Броварського заводу порошкової металургії (Україна) був створений новий тип гідравлічних ІВПМ [2] (рис. 1). Новий тип обладнання враховує усі вимоги, що висуваються до способу

формоутворення заготовок з карбідокремнієвих порошкових матеріалів.

Особливість даної машини – наявність рухомої траверси 6 із змінним інерційним вантажем 5, що інтенсифікує процес ущільнення заготовки 4. В осевій розточці станини 1 розміщений плунжер 2 виконавчої ланки, зв'язаного зі станиною 1 елементами пружного повернення 3. Направляючі колони 9 рухомої траверси 6 пропущені в розточку станини 1, а на нижній поперечині 10 закріплений циліндр 11 установочних переміщень. В залежності від вимог технології на машині, створеній по такій схемі, можна забезпечити вібраційний або віброударний режим пресування порошкових матеріалів. Режими пресування визначаються умовами взаємодії рухомих елементів самої машини, а також способом підключення і налагодження клапана-пульсатора 7 і гідроаккумулятора 8 ГІП.

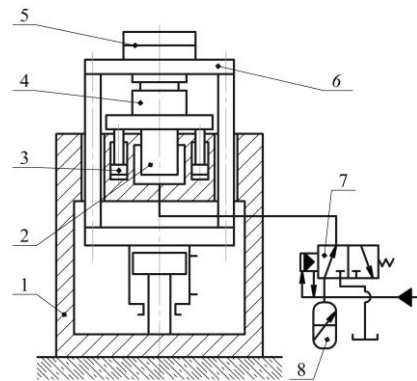


Рис. 1. Конструктивна схема інерційного вібропрес-молота

У досліджуваному технологічному комплексі для віброударного пресування ми можемо виділити три основні взаємопов'язані системи: об'єкт обробки (система I), робочий процес (система II) і машина (система III), які об'єднуються в загальну систему технологічного комплексу [4] (рис. 2).

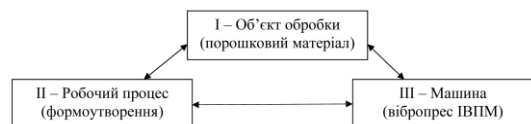


Рис. 2. Схема технологічного комплексу віброударного пресування вібропрес-молота

У випадку з ІВПМ об'єктом обробки є порошковий матеріал, який проявляє властивості метасистеми. Для останньої визначення проміжних станів в часі є складною і не завжди здійсненою задачею. Тому систему I необхідно подати у вигляді двох підсистем I.1 та I.2, що характеризують, відповідно, початковий (навішування порошкового матеріалу) та кінцевий (заготовка виробу) стани об'єкта обробки.

Система II функціонально залежить від системи I і являє собою технологічний процес пресування. Даний процес описується двома підсистемами II.1 та II.2, що встановлюють спосіб ВУП та прийнятий основний режим його реалізації.

Вибір системи III визначають системи I та II. Системою III є ІВПМ, який ділиться на підсистеми ГПП (III.1), рухомих ланок (III.2), вібробудувача (III.3) і прес-форми (III.4). Згідно з системним підходом кожна з виділених підсистем може бути поділена на ланки. Оскільки при створенні власне ІВПМ задачі проектування ГПП та його вібробудувача розв'язуються лише у загальному вигляді, а прес-форма складається з двох основних деталей – матриці і пунсона, на блок-схемі достатньо вказати лише підсистему III.2, яка містить станину з фундаментом (ланка III.2.1), вібростіл (основна робоча ланка III.2.2) і допоміжну робочу ланку III.2.3.

Використовуючи системний підхід при подальшому аналізі проектного вібропресового обладнання, можна виділити і внутрисистемні функціональні зв'язки. Функціональні зв'язки складових систем I та II вібропресового обладнання в аналітичній формі являє собою математичну модель робочого процесу ВУП.

II.2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Задача прийняття рішення щодо оцінювання ефективності функціонування всього технологічного комплексу полягає у виборі адекватного рішення N з множини рішень: Z_j ($j = \overline{1, J}$). Пропонується вибір здійснювати за допомогою оцінок ефективності функціонування технологічного комплексу на основі множини X оцінювальних параметрів: x_i ($i = \overline{1, n}$, $n \in N$).

Особливість математичної моделі полягає у тому, що вона враховує множину початкових вхідних параметрів: $K = (k_c)$ ($c = \overline{1, C}$). Множину оцінювальних параметрів системи: $X = (x_i)$ ($i = \overline{1, n}$). Функцію перетворення початкових параметрів на оцінювальні: $F_1: K \rightarrow X$. Множину декомпозиційних функцій згорання параметрів, за якими здійснюється ідентифікація стану системи: $D = (Y, \dots, S, P)$.

Для отримання результату щодо оцінювання ефективності функціонування процесу формоутворення при прийнятті рішення, виходячи з початкових вхідних оцінювальних параметрів K , необхідно реалізувати вище вказані функції в такій послідовності: $K \xrightarrow{F_1} X \xrightarrow{D} Z_j$.

Для визначення остаточної оцінки стану технологічного комплексу Z_j запропоновано враховувати комбінацію складних функцій – параметрів P_1, \dots, P_q – стану, що оцінюють групи показників вищого рівня ієрархії [5, 6]:

$$Z_j = F(P_1, P_q). \quad (1)$$

У свою чергу, вхідними даними для обчислення складних параметрів P_1 та P_q є сукупність параметрів, що оцінюють певні групи показників (S_1, \dots, S_p) , тобто:

$$P_1 = F(S_1, \dots, S_t), P_q = F(S_e, \dots, S_p), \quad (2)$$

де $t, e, p \in M$, а M – множина функціоналів узагальнюючих параметрів P -го рівня.

Складні параметри передостаннього рівня (Y_1, \dots, Y_m) є функціями від відповідних оцінювальних параметрів x_i стану:

$$Y_l = f(x_1, \dots, x_l), \dots, Y_m = f(x_k, \dots, x_n), \quad (3)$$

де $l, k, n \in N$, а N – множина вихідних параметрів.

При цьому оцінювальні параметри x_i визначаються на базі множини початкових вхідних параметрів K і функції перетворення:

$$F_1: X = F_1(K), K = (k_c), c = \overline{1, C}; X = (x_i), i = \overline{1, n}$$

Виходячи зі складених функцій (1)–(3), необхідно сформувати множину X відповідних параметрів для оцінювання ефективності функціонування всього технологічного процесу. Ця множина формується за допомогою множини початкових вхідних K параметрів (k_1, \dots, k_e) , де $e \in N$.

Запропоновано таку загальну структурну модель (рис. 3) оцінювання ефективності функціонування процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом [2].

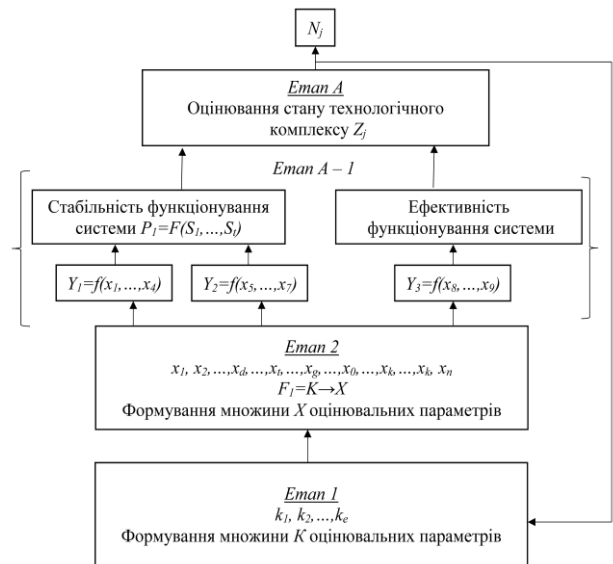


Рис. 3. Загальна структурна модель процесу оцінювання ефективності процесу формоутворення заготовок на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом

Визначаємо множину вихідних параметрів $Z = (Z_1, \dots, Z_j)$ за критеріями повноти та дієвості, що в повній мірі дозволяє задовольнити потреби споживачів цієї системи [3, 6]. Розглянемо кожне з Z_j ($j = \overline{1, 3}$) рішень: Z_1 – відмінний; Z_2 – нормальний; Z_3 – задовільний; Z_4 – критичний; Z_5 – незадовільний.

Для побудови методу оцінювання стану технологічного комплексу на основі нечітких визначимо множину T оцінювальних лінгвістичних термів, що являє собою сукупність значень лінгвістичних змінних. У нашому випадку лінгвістична змінна це – ефективність технологічного комплексу (заготовка – робочий процес – машина) (див. рис. 1). Для багатьох задач, що розв'язуються в межах людино машинних систем, точність отриманого розв'язку щодо рівня працездатного стану системи дозволяє ідентифікувати достатність:

- трьох – Н (низький), С (середній), В (високий) ($T=3$);
- п'яти лінгвістичних термів – Н (низький), НС (нижче середнього), С (середній), ВС (вище середнього), В (високий) ($T=5$).

Саме така кількість T дозволяє оптимізувати (як за критерієм часу, так і за складністю) роботу експертів. Далі задаємо поліномні функції належності μ^{Z_j} , $j = \overline{1, J}$ значень параметрів (x_1, \dots, x_9) лінгвістичним термам:

$$\mu^{HC}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x-a}{b-a}\right)^{1,2}, & x \in [a,b]; \\ 1, & x \in (b,b_1); \\ \left(\frac{k_1-x}{k_1-b_1}\right)^{0,8}, & x \in [b_1,k_1], \end{cases}$$

$$\mu^C(x) = \begin{cases} \left(\frac{x-a}{c-a}\right)^{1,2}, & x \in [a,c]; \\ 1, & x \in (c,c_1); \\ \left(\frac{k_1-x}{k_1-c_1}\right)^{0,8}, & x \in [c_1,k_1], \end{cases}$$

$$\mu^{BC}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x-a}{d-a}\right)^{1,2}, & x \in [a,d]; \\ 1, & x \in (d,d_1); \\ \left(\frac{k_1-x}{k_1-d_1}\right)^{0,8}, & x \in [d_1,k_1]. \end{cases}$$

$$\mu^B(x) = \begin{cases} \left(\frac{x-a}{k-a}\right)^{1,2}, & x \in [a,k]; \\ 1, & x \in (k,k_1]. \end{cases}$$

де $a, a_1, b, b_1, c, c_1, d, d_1, k, k_1$ – значення характеристичних точок, які визначаються власним баченням залучених експертів.

Агреговане значення параметрів a_j, \dots, k_i для кожного з показників визначаємо за формулою:

$$A_j = \sum_{s=1}^d k_{ns} \cdot Z_s, \quad (4)$$

де k_{ns} – компетентність s -го експерта; Z_s – значення параметра, надане s -м експертом.

Для отримання більш точної оцінки ефективності процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом піднесено поліномні функції належності $\mu(x_i)$ до степеню a_i .

Тоді значення функцій належності, набувають вигляду:

$$\mu^{Z_j}(x_i) = \mu^{Z_j}(x_i)^{a_j}, \quad j = \overline{1, \dots, J} \quad (J=5), \quad i = \overline{1, \dots, n} \quad (n=16). \quad (5)$$

Остаточним результатом є найбільше зі значень функцій належності μ^{Z_j} , тобто:

$$\mu^{Z_j} = \max\{\mu^{Z_1}, \mu^{Z_2}, \mu^{Z_3}, \mu^{Z_4}, \mu^{Z_5}\}. \quad (6)$$

Екстремальне значення поліномних функцій належності (6) для множини вихідних параметрів $Z=(Z_1, \dots, Z_j)$ характеризує оптимальність груп Y_1, \dots, Y_3 параметрів ефективності функціонування технологічного комплексу за критеріями повноти та дієвості.

Розглянемо результати теоретичного дослідження технологічного процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на базі представленого математичного методу оцінки ефективності технологічного процесу на базі вібраційного і віброударного обладнання. У якості зразка порошкового матеріалу досліджуваного технологічного процесу було обрано мінеральний порошок НЕФ (вологістю 13 %, зв'язка жирова (3,2 %) [4]. Для отримання залежностей характеристик досліджуваного технологічного процесу головним критерієм для оцінювання методу формоутворення обираємо якість заготовки.

П.3 РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

На основі вищевказаних розроблених моделей нечітких множин був розроблений алгоритм [1, 4] по визначенню середньої щільності заготовки для трьох видів режимів обробки ВУП (рис. 4), який залежить від зміни енергії одноциклового гідроаккумулятора E_a , а також від частоти вібрацій заготовки f .

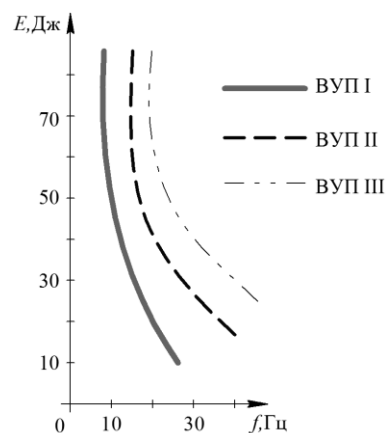


Рис. 4. Загальна структурна модель процесу оцінювання ефективності процесу формоутворення заготовок на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом

Даний алгоритм був реалізований на ЕОМ, результати розрахунку якого представлені на рисунку 5. Результатом розрахунку ми отримали графік (рис. 5) залежності зміни середньої щільності заготовки в залежності від: статичного навантаження заготовки – P , МПа; частоти вібрації заготовки – f , Гц; енергії одноциклового гідроаккумулятора E_a , Дж; нерівнощільності заготовки – ε_ρ , %.

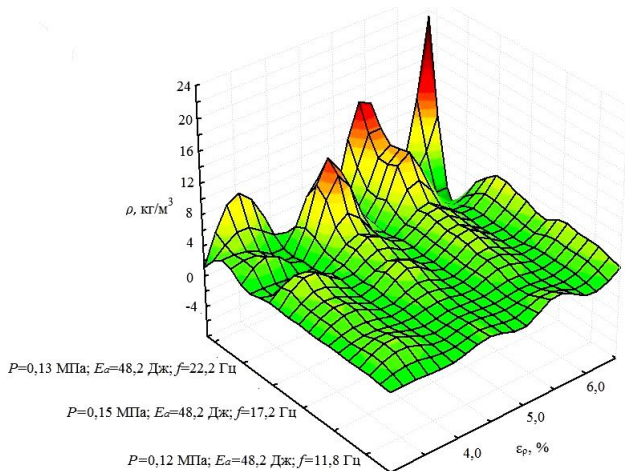


Рис. 5. Графік зміни середньої щільності отриманої заготовки з оброблювальних матеріалів в залежності від зміни технологічних параметрів ВУП

Для матеріалу з мінеральних порошків М1 сукупність оптимальних технологічних показників знаходяться в режимі ВУП-І становлять для середньої щільності матеріалу $\rho=2,3 \text{ кг/м}^3$ для нерівнощільності $\varepsilon_\rho=6,5 \%$.

Аналіз матриці знань для оцінювання груп параметрів (Y_1, \dots, Y_3) якісних характеристик досліджуваних матеріалів засвідчив, що оптимальними технологічними параметрами обробки матеріалів М1 є тиск $P=0,12 \text{ МПа}$. Проте слід відзначити зростання досліджуваних показників середньої щільності та нерівнощільності оброблюваного матеріалу при збільшенні енергетичних характеристик обробки та зменшення частоти технологічного впливу.

Також значення якісних параметрів матеріалу М1 (щільності та нерівнощільності оброблюваного матеріалу) за умови режиму роботи $P=0,12 \text{ МПа}$; $E_a=85,8 \text{ Дж}$; $f=8,2 \text{ Гц}$ супроводжується значними енерговитратами за умови зниження якісних характеристик.

Змінюючи величину енергії E_a у межах конкретного режиму ВУП можна забезпечити зменшення або збільшення середньої щільності зразка з будь-якого вказаного порошкового матеріалу, до його недопресовування або перепресовування [1, 3, 5]. Для постійної величини енергії E_a збільшення тривалості процесу ВУП дозволяє збільшувати середню щільність заготовок тільки до визначеної межі. Подальше збільшення середньої щільності зразка практично

залишається незмінним, а якість помітно знижується в результаті перепресовування і руйнування.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано процес формоутворення заготовок з порошкових матеріалів і визначено збільшення середньої щільності заготовок на 60–70 %, відносно статичного пресування, вібраційним і віброударним способом обробки на основі розробленої структури вібропресових формувальних машин, типів приводів та їх характеристик.

2. На основі системного підходу і складених множин конструктивних параметрів технологічного обладнання розроблена математична модель визначення середньої щільності заготовки. Показано, що вона представляє собою множину початкових вхідних конструктивних і оцінювальних технологічних параметрів (заготовка, робочий процес, машина) і функцій перетворення початкових параметрів на оцінювальні функції. На основі множин оцінювального параметру отримані поліномні функції належності для оцінки характеристик функції віброударного режиму навантаження процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів.

3. За допомогою екстремуму масиву значень функції належності, як критерію повноти та дієвості, для множин середньої щільності заготовки із чотирьох зразків порошкових матеріалів було обрано ефективні режими віброударного навантаження. Для заготовок типу – мінеральний порошок НЕФ (вологістю 13 %, зв'язка жирова 3,2 %), і мінеральний порошок НЕФ (вологістю 2 %, зв'язка відсутня) – віброударний режим типу І (середня енергія гідроаккумулятора $E_a=55,3 \text{ Дж}$, частота вібрації заготовки – $f=11,2 \text{ Гц}$);

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] F. H. Harlow, J. E. "Welch Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface" in *Phys. Fluids*, 1965. vol. 8, n.12. pp. 2182 – 2189.
- [2] Rostislav Iskovich-Lototsky, Ivan Kots, Yaroslav Ivanchuk, Yevheniy Ivashko, Konrad Gromaszek, Assel Mussabekova, Mashat Kalimoldayev. "Terms of the stability for the control valve of the hydraulic impulse drive of vibrating and vibro-impact machines" // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2019. Vol. 4, no. 19. – P. 19-23. doi: 10.15199/48.2019.04.04.
- [3] F. Menter, M. Kuntz, R. Langtry, "Ten years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model" in *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, Begell House, Inc., 8 p.
- [4] R. D. Iskovych-Lototsky, Y. V. Ivanchuk, Y. P. Veselovsky, "Simulation of working processes in the pyrolysis plant for waste recycling" in *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. 2016. Vol. 1, № 8 (79). pp. 11–20. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59419.
- [5] R. D. Iskovych-Lototsky, O. V. Zelinska, Y. V. Ivanchuk, N. R. Veselovska, "Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials" in *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. 2017. Vol. 1, № 1(85). pp. 9–17. doi: 10.15587/1729-4061.2017.59418.
- [6] Rostislav D. Iskovych-Lototsky, Yaroslav V. Ivanchuk, Natalia R. Veselovska, Wojciech Surtel, Samat Sundetov. "Automatic system for modeling vibro-impact unloading bulk cargo on vehicles" in *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2018, 1080860 (1 October 2018). doi: 10.1117/12.2501526.