

**Р. Д. ІСКОВИЧ-ЛОТОЦЬКИЙ, О. В. ЗЕЛІНСЬКА
Я. В. ІВАНЧУК**

**ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНКИ
ПАРАМЕТРІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ
ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ
МАТЕРІАЛІВ НА ВІБРОПРЕСОВОМУ
ОБЛАДНАННІ З ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Р. Д. Іскович-Лотоцький, О. В. Зелінська,
Я. В. Іванчук**

**ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ
ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ
ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З
ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА
ВІБРОПРЕСОВОМУ ОБЛАДНАННІ З
ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2018

УДК 629.979:621.768.4.06:621.777.01
I-86

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № від 25.01.2018 р.)

Рецензенти:

І. В. Севостьянов, доктор технічних наук, професор

Л. Г. Козлов, доктор технічних наук, професор

Н. Р. Веселовська, доктор технічних наук, професор

Іскович-Лотоцький, Р. Д.

I-86 Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, О. В. Зелінська, Я. В. Іванчук. — Вінниця : ВНТУ, 2011— 153 с.

ISBN 978-966-641-...

Визначено високу ефективність технологічного процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів за допомогою вібраційної і віброударної обробки. Розглянутий системний підхід до технологічного процесу формоутворення і на основі нечітких множин і була виконана оцінка ефективності функціонування технологічного комплексу. На основі отриманих експериментальних даних досліджені параметри системи технологічного комплексу формоутворення заготовок на вібропресовому обладнанні. Розроблена автоматизована система розрахунку основних параметрів інерційного навантаження заготовки та конструктивних параметрів інерційного вібропрес-молота.

УДК 629.979:621.768.4.06:621.777.01

ISBN 978-966-641-...

© Р. Іскович-Лотоцький, О. Зелінська, Я. Іванчук, 2018

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП..... | 5 |
| 1 Аналіз сучасного стану процесів та обладнання для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів..... | 9 |
| 1.1 Загальні відомості про процеси формоутворення..... | 9 |
| 1.2 Процеси вібраційної та віброударної обробки..... | 13 |
| 1.3 Використання вібрацій при формоутворенні заготовок з порошкових матеріалів..... | 16 |
| 1.4 Вібропресове обладнання для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів..... | 21 |
| 2 Дослідження підсистем технологічного комплексу віброударного пресування..... | 30 |
| 2.1. Фізико-механічні властивості заготовок під віброударним пресуванням..... | 30 |
| 2.2 Інерційний вібропрес-молот з гідроімпульсним приводом..... | 35 |
| 2.3 Основні робочі режими інерційного вібропрес-молота..... | 39 |
| 2.4 Технологічний комплекс для віброударного пресування..... | 43 |
| 2.5 Теоретичні основи оцінки ефективності та надійності роботи складових технологічного комплексу для віброударного пресування..... | 48 |
| 2.6 Оцінка ефективності функціонування технологічного комплексу для віброударного пресування..... | 51 |
| 2.7 Оцінка надійності роботи системи ІВПМ..... | 56 |
| 3 Побудова математичних моделей та методів оцінки ефективності функціонування технологічного комплексу..... | 60 |
| 3.1 Розробка моделі функціонування ІВПМ технологічного комплексу віброударного пресування..... | 60 |
| 3.2 Аналіз моделі функціонування ІВПМ технологічного комплексу віброударного пресування..... | 68 |
| 3.3 Використання нечіткої логіки для оцінки ефективності функціонування технологічного комплексу віброударного пресування..... | 77 |
| 3.4 Метод оцінки стану технологічного комплексу на базі математичного апарату нечітких множин..... | 84 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4 | Експериментальні дослідження процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом..... | 101 |
| 4.1 | Оцінка параметрів експериментальних зразків заготовок для віброударного пресування..... | 101 |
| 4.2 | Експериментальна установка ІВПМ для дослідження віброударного пресування..... | 102 |
| 4.3 | Аналіз і обробка результатів експериментальних даних..... | 108 |
| 4.3.1 | Теоретичні основи обробки і аналізу експериментальних даних..... | 108 |
| 4.3.2 | Результати експериментальних досліджень..... | 111 |
| 5 | Вдосконалення системи проєкування і оцінки технологічного комплексу віброударного проєкування..... | 119 |
| 5.1 | Автоматизація розрахунку і проєкування технологічного комплексу для віброударного пресування..... | 119 |
| 5.2 | Оцінка ефективності та прогнозування роботи технологічного комплексу..... | 127 |
| 5.3 | Визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу..... | 131 |
| 5.4 | Функціонально-вартісний аналіз технологічного комплексу..... | 133 |
| | ВИСНОВКИ..... | 138 |
| | ЛІТЕРАТУРА..... | 140 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВМ – вібраційна машина;
ВУМ – віброударна машина;
ВУ – віброударний (метод обробки, процес);
ВУП – віброударне пресування;
ГП – гідроімпульсний привод;
ІВПМ – інерційний вібропрес-молот;
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
НЕФ – низьковольтний електрофорфор;
ТО – технологічне обладнання;
ФМ – формувальна машина;
ФВА – функціонально-вартісний аналіз.

ВСТУП

Розвиток сучасного машинобудування є значущим чинником технічного прогресу, оскільки корінні перетворення в будь-якій сфері виробництва можливі лише в результаті створення досконаліших машин і розробки принципово нових технологій. Широке використання знаходять вібраційні та віброударні технологічні процеси, а також обладнання для їх реалізації.

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 виробів з порошкових матеріалів (карбідів, боридів та ін.), які повинні мати відповідні міцність, щільність і рівнощільність по об'єму в умовах безвідходного виробництва для того, щоб дану заготовку можна було транспортувати до камери спікання без втрати форми. 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, забезпечувати якість формованого виробу.

Значний внесок у вирішення цих питань внесли Блехман І. І., Іскович-Лотоцький Р. Д., Земськовий В. Д., Лаптев О. М., Матвеев І. Б., Обертюх Р. Р., Огородніков В. А., Потураєв В. М., Рудь В. Д., Сиріцин Т. О., Ушаков І. О., Халфін М. А., Фролов К. В., Ям В. М. та інші вчені. Проблема підвищення ефективності процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом є важливим техніко-економічним завданням, вирішення якого відкриває шляхи для науково-обґрунтованого призначення показників ефективності. Підвищення ефективності складного процесу є серйозним резервом для економії засобів, матеріалів, енергії і трудових витрат. Розвиток комплексного підходу до проблеми підвищення ефективності процесу формоутворення, при раціональному поєднанні фундаментальних рішень питань теорії надійності і прикладних завдань підвищення ресурсу машин і конструкцій, є одним з актуальних і найважливіших завдань сучасного машинознавства.

У монографії докладно висвітлені основні етапи науково-дослідницької діяльності, розглянуто коло основних проблем, пов'язаних із забезпеченням результативності та об'єктивності наукової діяльності: вибір напрямку та теми наукового дослідження, пошук, накопичення і обробка наукової інформації, визначення об'єкта і предмета, методології дослідження, оформлення результатів наукової роботи.

У першому розділі монографії проаналізовані основні технологічні процеси, в яких використовуються вібраційні та віброударні впливи. Розглянуто вібраційну машину як структуровану технологічну систему. Вібраційну машину з гідроімпульсним приводом подано у вигляді технологічної системи, яку можна визначити сукупністю її структурних складових та взаємозв'язків між ними, що упорядковані з метою виконання певної виробничої функції в умовах робочого режиму. Визначено основні напрямки підвищення ефективності процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні.

У другому розділі дисертаційної роботи досліджено структурні та функціональні зв'язки між складовими простіших систем та всередині них і доведено доцільність використання системного підходу дослідження вібраційної машини як технологічного комплексу.

Досліджено фізико-механічні властивості заготовок та робочі процеси ІВПМ з ГПП. Розглянуто два варіанти підключення віброзбуджувача, який визначає можливість реалізації на ІВПМ різних робочих параметрів віброударного пресування. Розглянуто класифікацію основних робочих режимів ІВПМ і виділено три робочих режими.

Проаналізовано параметри кожної з систем і залежність між собою. Доведено, що системний підхід до проблеми підвищення ефективності процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом є одним з актуальних і найважливіших завдань.

В третьому розділі монографії побудовані моделі та вибрані методи для підвищення ефективності процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на ІВПМ з ГПП. Наведена загальна схема оцінювання ефективності функціонування систем короткочасної дії та систем тривалої дії.

Визначено, що ефективність функціонування такої системи залежить від складових, які можна покращити, використавши метод лока-

льного випадкового пошуку або алгоритмічну модель випадкового пошуку ідентифікації багатостадійного технологічного процесу, також використавши напрацювання експертних систем, де розроблені методи досліджень різноманітних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеності.

Розроблено підходи і алгоритми оцінювання точності чисельних розрахунків надійності та ефективності роботи елементів ІВПМ. Створена узагальнена модель складання й обґрунтування множин вхідних та вихідних параметрів для оцінювання ефективності функціонування процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з ГПП. Вперше побудований метод оцінювання процесу формоутворення на базі математичного апарату нечітких множин.

В четвертому розділі монографії на основі проведених експериментальних досліджень пресування чотирьох заготовок різних матеріалів еталонних зразків на ІВПМ було отримано числову базу даних якісних характеристик досліджуваного процесу.

Статистичний аналіз експериментальних даних за методом комплексного ранжирування вхідних параметрів дозволив визначити оптимальні технологічні параметри обробки досліджуваних матеріалів, а також підтвердив правильність підходів до розробки методу оцінювання процесу формоутворення на базі математичного апарату нечітких множин.

Завершується монографія розглядом розробленої програми для автоматизації розрахунку параметрів інерційного навантаження кінцевої продукції та алгоритму розрахунку конструктивних параметрів ІВПМ. Переваги даної програми в розрахунку основних значень технологічного комплексу, за якими можна аналізувати ефективність функціонування всього процесу. Монографія є результатом узагальнення науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи, виконаної авторами на кафедрі Галузевого машинобудування Вінницького національного технічного університету. Вказана робота виконувалась за координаційними планами науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Загальні відомості про процеси формоутворення

Технології, які характеризуються процесами формоутворення заготовок, в яких реалізується текучість матеріалів із складною реологією в умовах складного навантаження, потребують нових розробок, вивчення та вдосконалення. Вони неможливі без застосування як розрахунково-експериментальних методів, традиційних теорій пружно-пластичності та обробки металів тиском, так і створення нових підходів для вирішення різних прикладних задач.

Технологічний процес виготовлення виробів з нових високо-ефективних матеріалів [21, 42, 117] на основі порошків металів і неметалів, їх сплавів та з'єднань з наповнювачами, можна уявити послідовно виконуваними операціями підготовки шихти (порошкового матеріалу), формоутворення заготовок та їх термообробки [24, 50, 89, 114].

Для підготовки однорідної шихти заданого складу необхідно здійснити змішування порошкових компонентів і наповнювача в кульових млинах, планетарних, шнекових, лопатевих і вібраційних змішувачах або осадженням одного з компонентів шихти на поверхню частинок іншого. Для цього використовуються механічні (вихровий розмел, подрібнення в кульових і вібраційних млинах, розпилення водою і газом) і хімічні (електроліз, відновлення, розкладання, металотермія) методи для приготування порошків, що визначають форму (осколкову, сферичну, пелюсткову, та інші) та дисперсність частинок порошку. Поділ порошків за фракціями здійснюється шляхом ситового аналізу, сепарування або мікроскопічного аналізу. Як наповнювачі широко використовуються рідкий бакеліт, розчин синтетичного каучуку в бензині, парафін, парафіно-воскові сплави, солі жирних кислот, захисні колоїди, гас, бензол та інші [111, 115].

Методами пресування здійснюється формоутворення заготовок, вільного насипання у форму, лиття суспензій і паст, ущільнення утрамбування і рядом їх комбінацій [111]. Найпоширеніше формоутворення заготовок методом пресування, реалізованим різними спо-

собами, наприклад, простим [24, 830], східчастим [53, 52], ізостатичним [52, 53], мундштуковим [24, 115], імпульсним [23, 87, 86], ударним [54], вібраційним [36, 39, 93], віброударним [69, 127, 129]. Пресування здійснюється на відповідному пресовому обладнанні за рахунок тиску, створюваного пуансоном під дією осьового зусилля на відкритій поверхні порошкового матеріалу, розміщеного в контейнері звичайної прес-форми закритого типу [110], або стисненням однорідним середовищем (рідиною, газом) при використанні оболонкових форм [52, 94]. Задану схему пресування забезпечує конструктивне виконання прес-форми (одно- або двостороннє; з плаваючою матрицею; з рухомим пуансоном тощо) [110]. Застосування інших методів формоутворення визначається їх можливостями і залежить від вимог, що висувуються до складу шихти, геометричних і фізико-механічних характеристик заготовок [111, 114].

Перетворення заготовки в міцні вироби із заданими фізико-механічними властивостями забезпечує термообробка. Сушінню або низькотемпературній термообробці (при температурі до 200 °С) після формоутворення піддаються заготовки практично зі всіх порошкових матеріалів з метою їх додаткового зміцнення перед транспортуванням, складанням або завантаженням в зону високотемпературної термообробки (спікання, випалу).

Спікання [50, 111, 114] супроводжується нагріванням і витримкою заготовки при температурі спікання T_{cn} нижчій температури плавлення T_{nl} частинок металу і характерне для металопорошків. Звичайно $T_{cn} = (0,7...0,9)T_{nl}$ [21]. До основних видів спікання належать: спікання у твердій фазі і рідкофазне спікання. Випал [92, 109] характерний для одержання виробів з багатокомпонентних оксидних порошків вогнетривких і керамічних матеріалів і передбачає в процесі термообробки рідкофазне спікання тільки деяких компонентів складу шихти. Насправді, випал і спікання є ідентичними операціями.

Структурна класифікація методів та обладнання процесів формоутворення заготовок показана на рисунку 1.1 [75, 26].

Розв'язання на основі методів порошкової металургії задач одержання для різних галузей економіки нових прогресивних матеріалів із заданими властивостями безпосередньо пов'язано з вирішенням ряду проблем виготовлення виробів з даних матеріалів, що виникають на відповідних етапах технологічного процесу.

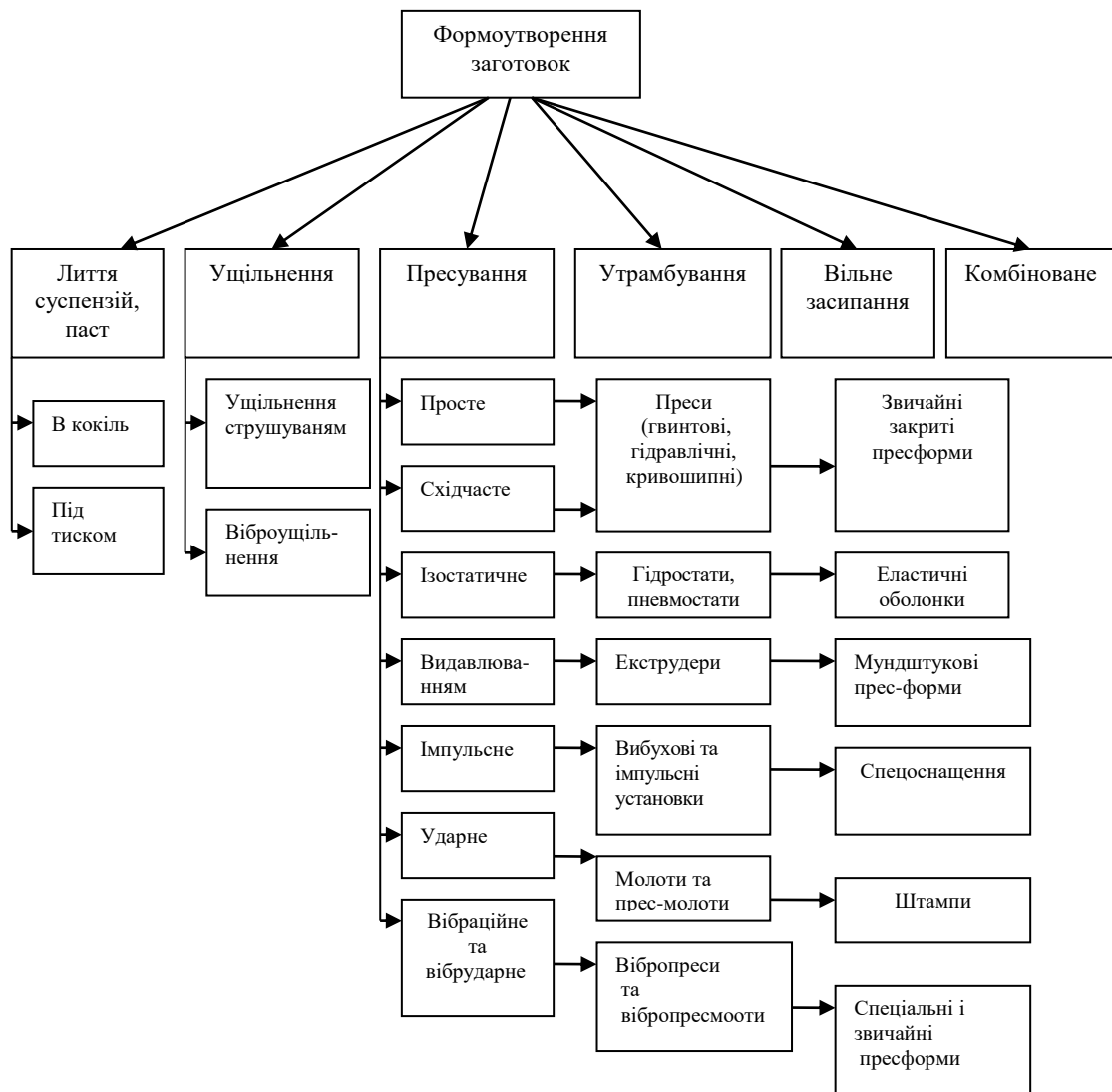


Рис. 1.1. Класифікація вібропресових формувальних машин

З аналізу вказаних проблем бачимо, що задача реалізації процесів формування заготовок з порошкових матеріалів, особливо складної конфігурації і великих габаритів, є однією з найактуальніших та найважливіших. Існуючі методи розв'язання даної задачі часто не забезпечують можливості розширення та відновлення номенклатури й асортименту випуску виробів із прогресивних порошкових матеріалів у зв'язку з тим, що заготовки вказаних виробів не відповідають (або відповідають частково) цілому ряду технічних вимог – заданим оптимальним значенням:

- густини та допустимої нерівноцільності;
- механічної міцності для безпечного виймання виробу з пресформи, його транспортування та складування;

– пористості та фізичного стану дисперсних частинок, як основи порошкового матеріалу;

– ступеня відповідності конфігурації заготовки готовому виробу.

Метод пресування з відомих методів формоутворення є найрозповсюдженішим, внаслідок своєї економічності та простоти реалізації. Способи пресування дозволяють під час формоутворення заготовок забезпечити переважне виконання деяких пунктів зазначених вище технічних вимог і в результаті одержати виріб з потрібними експлуатаційними властивостями. Наприклад, застосування способу простого пресування може забезпечити високу густину і, як наслідок, достатню міцність заготовок невеликих виробів простої конфігурації (типу втулки, вкладиші тощо) з відношенням висоти до ширини (діаметра), що лежать в межах 2,0...2,5 [111]. Але він є непридатним для формоутворення великогабаритних заготовок через неможливість забезпечення їх високої рівногустини по об'єму та міцності, а також внаслідок необхідності застосування обладнання, що створює високі питомі зусилля на заготовці від 100 до 1000 МПа, в залежності від марки пресованого матеріалу [109, 114]. Просте пресування є також неприйнятним при необхідності формоутворення заготовок виробів складної конфігурації. Винятком є заготовки невеликих виробів, що піддаються додатковій обробці різанням [114], внаслідок чого істотно підвищується їх вартість у цілому.

Ізостатичне пресування є технологічним процесом, заготовки під впливом ізостатичного тиску та високої температури в газовому середовищі пресуються майже до своєї теоретичної питомої щільності [109]. Різновид даного способу – гідростатичне пресування при робочому тиску до 1000 МПа широко використовується на заводах вогнетривів під час випуску унікальних виробів для хімічної промисловості та чорної металургії [52, 94].

Східчасти пресування забезпечує кращу релаксацію пружних напружень, сприяє витісненню повітря в результаті стиснення порошку, підвищенню густини та рівногустини заготовок, зниженню в них пружних деформацій [79, 108]. Даний спосіб пресування рекомендується для формоутворення великогабаритних заготовок простої конфігурації, але має низьку продуктивність.

Вищу густину заготовки може забезпечити тільки імпульсний спосіб пресування, але його реалізація в ряді випадків супроводжуєть-

ся певними труднощами, пов'язаними з експлуатацією обладнання. Так, імпульсне вибухове пресування в порошковій металургії застосовується порівняно рідко, головним чином, у дослідному одиничному або дрібносерійному виробництві плит, труб, профілів довжиновимірних тонкостінних виробів [114] тощо. Імпульсне гідродинамічне пресування застосовується для формоутворення заготовок невеликих виробів типу втулок і кілець [23, 42, 87].

Таким чином, визначення способів ВУ та ВУП в даний час пов'язане з труднощами, які полягають у тому, що деякі автори визначають процес формоутворення заготовки з порошкового матеріалу в прес-формі закритого типу, як «формування» під впливом тиску на неї з боку пуансона [106]. З урахуванням існуючих розбіжностей ряд аналогічних способів формоутворення при одночасному накладенні вібрацій (або вібрацій і ударів) на елементи прес-форми був визначений як віброформування [41, 43, 124], віброущільнення [37, 64] або віброударне ущільнення [128, 129]. Однак, відповідно до загальноприйнятої в теорії процесів обробки тиском термінології [118], у прес-формі під впливом тиску на заготовку з боку пуансона здійснюється процес пресування. Тому, на нашу думку, вказані способи одержання заготовок слід віднести до способів формоутворення заготовок методом пресування, доповнивши ними відомі способи, наприклад, вібраційного [36, 86, 93] та віброударного [69, 109] пресування.

1.2 Процеси вібраційної та віброударної обробки

У порівнянні з іншими способами пресування, вібраційне та віброударне пресування забезпечує виконання технічних вимог до заготовки більш економно. Останнє пояснюється значним (у десятки і навіть сотні разів) зниженням робочого зусилля у порівнянні із зусиллям статичного пресування [66, 90], зменшенням зносу деталей прес-форм, а також забезпеченням можливості виготовлення заготовок з тонкими стінками [68]. Ефективність вібраційного пресування відзначається при формоутворенні заготовок виробів складної конфігурації і великих габаритів, виробництво яких раніше було утруднено або практично неможливо [40, 41].

В основі реалізації вібраційної технології лежить дія вібраційного поля, тобто заданого амплітудно-частотного режиму коливань на оброблювані деталі. Ця дія відбувається або за рахунок вібраційного-переміщення деталей або безпосереднього впливу вібрації на вироби для формування необхідних їм властивостей. Вібраційне навантаження реалізується в машинах із жорстко приєднаними вібробудувачами (машини для формування, ущільнення, стабілізації, руйнування та інші), або за рахунок дії спеціально підбраного вільногранульованого робочого середовища, коливальні рухи якого визначають мікрота макроструктуру поверхневого шару деталей, що використовуються для реалізації очисних, мийних, шліфувальних, полірувальних та інших операцій з оздоблювально-зачисної обробки; для поверхневого віброзміцнення, зняття заусенець, заокруглення різальних кромки, видалення небажаного шару на поверхні деталей [22].

Отже, коливальні процеси які реалізуються з порівняно малою амплітудою та частотою (в межах 10...100 Гц), можна вважати технологічними вібраціями. Технологічна дія вібрації полягає у цілеспрямованому впливі на об'єкт змінних за часом параметрів, серед яких можна відзначити кінематичні, силові та енергетичні.

Кінематичні параметри характеризують закономірності руху виконавчих органів вібраційної машини. Силові параметри вібрації зумовлюють закономірності технологічної дії на об'єкт обробки. Енергетичні характеристики відображають закони взаємоперетворення енергії, що споживається або витрачається коливальною системою.

Для реалізації вібраційної технологічної дії коливальна система, як правило, примусово виводиться з положення рівноваги внаслідок створення умов для виникнення силової та моментної незрівноваженості. До основних енергетичних параметрів вібрації відносять роботу внутрішніх та зовнішніх сил коливальної системи; складові потужності, що витрачаються та споживаються системою при здійсненні технологічного циклу.

У вібраційному полі зчеплення між частинками технологічної маси послаблюється, що призводить до виникнення в системі станів псевдозрідження і псевдотекучості [16]. Такий стан оброблюваного середовища характеризується створенням сприятливих умов як для ефективного перемішування маси за рахунок збільшення площі кон-

тактої взаємодії, так і для зниження витрат на переміщення матеріалу внаслідок зменшення величини внутрішнього тертя.

Таким чином, універсальність вібраційної обробки полягає в тому, що вона є найбільш ефективним серед механічних методів загальним засобом регулювання динамічного стану продукції при здійсненні різноманітних технологічних задач [10].

Так, внаслідок коливного руху робочих органів вібромашини спостерігаються достатньо складні траєкторії руху часток робочого середовища і запасається значна потенціальна енергія внаслідок якісної зміни характеру положень рівноваги структурних елементів системи. Вібрація спричиняє розділення часток продукції в залежності від їхніх фізико-механічних властивостей, інтенсивно переміщує маси матеріалу, руйнує структуру матеріалу в резонансних режимах та інші фізичні ефекти, що знаходять використання в широкому спектрі технологій [75].

Вібраційні та віброударні процеси застосовуються практично в усіх галузях промисловості. Висока ефективність даних процесів забезпечується завдяки реалізації найоптимальніших силових впливів на об'єкт обробки, а також досягненням в результаті цього його необхідних внутрішніх фізико-механічних параметрів, в тому числі міцності та щільності.

Класифікація процесів за ознаками вібраційних та віброударних дій здійснюється залежно від того, яка зі складових навантаження коливальна (пульсуюча) або ударна (імпульсна) є основною в даній конкретній технології. Саме названі складові і є факторами інтенсифікації цих процесів [10, 13, 30].

Під час реалізації вібраційних процесів об'єкт обробки або виконавчий робочий елемент машини здійснюють коливальні рухи з невеликою (порядку кілька міліметрів або часток міліметра) і достатньо високою (до 100 Гц) частотою [125].

В таблиці 1.1 наведені основні технологічні процеси, в яких використовуються вібраційні або віброударні навантаження. Реалізація даних процесів здійснюється на основі серійного або дослідно-конструкторського вібраційного та віброударного обладнання [34, 27, 2].

1.3 Використання вібраційного та віброударного навантаження при формоутворенні заготовок з порошкових матеріалів

З важливих етапів виготовлення виробів з порошкових матеріалів є процес формоутворення напівфабрикату. Він забезпечує задані показники якості напівфабрикату, а саме: рівнощільність, щільність, механічну міцність та ін. з урахуванням особливостей підготовки однорідної шихти і вибраних методів формоутворення [16, 68, 75].

Поряд з традиційними методами формоутворення широко застосовуються їхні нові прогресивні різновиди (способи), що передбачають застосування корисних вібрацій, віброущільнення, вібраційне та віброударне пресування [8, 45, 51].

Підвищити якість готових виробів, знизити потужності пресового устаткування дозволяють вібраційні способи оформлення напівфабрикату, а в деяких випадках і є єдино можливими. Ефективність впливу вібрації пов'язана з підвищенням ступеня рухомості матеріалу в процесі формоутворення, завдяки зниженню сил тертя-зчеплення між окремими частинками матеріалу і між матеріалом і стінками пресформи [75].

Віброущільнення порошкових матеріалів в порошковій металургії частіше застосовується як підготовча при ізостатичному пресуванні. Використовуючи вібрацію, домагаються оптимальної, з точки зору подальших операцій, щільності укладання порошку при високому ступені рівномірності укладання за обсягом форми. Це важливо при виготовленні деталей складної конфігурації, характерних для ізостатичного пресування, тому що істотно підвищується вихід придатних виробів [126, 27].

Віброущільнення ефективно при роботі з важкодеформованими непластичними порошками кераміки, твердими і жароміцними сплавами. Характерною особливістю цього способу є те, що віброущільнення проводять без використання додаткового вантажу на відкритій поверхні ущільнюваної порошкової шихти. Під дією вібрації порошок переходить у «псевдозріджений» стан, який добре заповнює порожнини форми, прагнучи досягти найбільш ефективного упакування. Діапазон технологічних режимів, при яких відбувається одночасне «зрідження» і ущільнення порошку, досить вузький. Підвищення

Таблиця 1.1

Основні вібраційні та віброударні технологічні процеси

| Технологічний процес | Технологічна операція | Метод обробки | Галузь економіки | Примітка |
|--|--|---------------|---|------------------------------|
| Отримання заготовок виробів з непластичних порошкових матеріалів | Ущільнення, формоутворення, пресування | ВУ | Електротехнічна промисловість, металургія, машино-, автомобілебудування | Промислове впровадження, НДР |
| Отримання виробів з пластичних матеріалів при обробці тиском | Витягування, осадження, штампівування, калібрування, волочіння, розкочування | В | Машинобудування, Сільське господарство | |
| Остаточна обробка виробів абразивними матеріалами | Шліфування, полірування, доробка, зміцнення | В | Машинобудування | |
| Виготовлення ливарних форм | Формоутворення, ущільнення | ВУ | Металургія, ливарне виробництво | Промислове впровадження |
| Виробовування деталей та вузлів | Ресурсні, форсовані та інші типові випробовування | В, ВУ | Приладобудування, радіотехніка, авіа-, тракторо-, машинобудування | Промислове впровадження, НДР |
| Навантажувально-розвантажувальні роботи | Розвантаження ємностей із сипкими вантажами, транспортування, навантаження | В, ВУ | Залізничний і автомобільний транспорт, Сільське господарство | |
| Будівельно-монтажні роботи | Забивання палів, ущільнення ґрунтів, пісків, бетонів | ВУ | Будівництво | Промислове впровадження |
| Садово-збиральні роботи | Збирання урожаю фруктів і ягід | ВУ | Сільське господарство | НДР |

інтенсивності вібрацій призводить до розуцільнення матеріалу – віброкипінню і розшарування порошку по фракціях – сегрегації [10, 75]. Для поліпшення умов ущільнення порошкової шихти у верхній частині форми і відкриту поверхню навантажують питомим зусиллям до 1 МПа. Однак у цих умовах процес віброущільнення відповідно до загальноприйнятої в теорії процесів обробки тиском термінології, на нашу думку, більш відповідає вібропресуванню. Підвищення ефективності віброущільнення досягається використанням коливань несиметричної форми [10, 16]. Таке навантаження дозволяє створювати великі значення прискорень при русі частинок порошку вниз, ніж при їх русі вгору. Також ефективність віброущільнення значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей порошку: гранулометричного складу, форми і міцності зерен [16].

Механізм процесів віброущільнення досить добре вивчений, що дозволяє обґрунтувати вимоги до вибору технологічних режимів вібронавантаження. Складність полягає в необхідності забезпечення рівних умов вібронавантаження матеріалу по всьому об'єму форми.

Відомо використання віброущільнення для попереднього заповнення капсул в технологічній лінії з виробництва газотурбінних дисків. Ущільнювальним матеріалом є порошок жароміцного сплаву з розміром зерен від 40 до 80 мкм і кутом природного відкосу 20° . Цим порошком у вакуум-камері заповнюються тонкостінні сталеві капсули. Остаточне пресування і спікання проводиться в газостаті [75].

Перехід від віброущільнення до вібропресування відбувається, як зазначалося вище, практично при створенні тиску на відкритій поверхні порошкового матеріалу у формі. Необхідність навантаження відкритої поверхні порошкового матеріалу обумовлена вимогами до підвищення якості напівфабрикату виробу в процесі формоутворення при неможливості наступних формотворчих операцій. Тому вібропресування використовується, головним чином, як самостійна операція формоутворення напівфабрикату перед термообробкою (спіканням або випалюванням).

Вібропресування, як і віброущільнення, дозволяє підвищити ступінь рухомості порошкового матеріалу, забезпечити рівномірний його розподіл у формі із заданою щільністю.

Вібраційне пресування має ряд переваг у порівнянні зі статичним пресуванням:

– дозволяє значно зменшити перепади щільності в тілі напівфабрикату, особливо при холодному пресуванні важкодеформівних порошків, наприклад, твердих сплавів;

– полегшує вихід повітря з пресування, значно знижує пружне розширення напівфабрикату при витяганні його з прес-форми;

– дозволяє знизити в кілька разів зусилля пресування, що усуває необхідність застосування потужних, дорогих і важких пресів.

Зазвичай вібропресування здійснюється в прес-формах закритого типу при навантаженні заготовки статичним пресовим зусиллям у поєднанні з вібраційним впливом на елементи прес-форми. Залежно від застосовуваної схеми пресування вібраційному впливу можуть піддаватися один або обидва пуансони чи матриця.

В останніх дослідженнях авторами отримані результати, які підтверджують найбільш високу ефективність формоутворення напівфабрикатів виробів з порошкових матеріалів способом віброударного пресування. Цей спосіб реалізується при інерційній схемі навантаження порошкового матеріалу в прес-формі за допомогою верхнього пуансона, пов'язаного з рухомою поперечною і змінною інерційною масою, та нижньому вібраційному приводі робочого столу преса [2, 3, 67].

Віброударне пресування напівфабрикату в закритій прес-формі (як і вібраційне) умовно можна розділити на три етапи.

Перший – початковий етап відбувається при відносно низьких тисках до 1...2 МПа, які визначаються масою інерційного додаткового навантаження, і характеризується відсутністю сформованої структури в матеріалі та значним осадженням зразків. На цьому етапі пресування поведінка порошкового матеріалу може бути описана в'язко-пластичною моделлю, оскільки пружні його властивості виражені слабо. Вібраційний вплив, в цих умовах, сприяє перерозподілу порошку і забезпечує рівномірне його укладання, що особливо важливо для виробів складної конфігурації з різною висотою пресування.

Другий етап – пружно-в'язко-пластичний – пов'язаний з утворенням жорсткого «скелета» з частинок основи, який на третьому етапі чинить значний опір подальшій пружно-в'язкій деформації напівфабрикату. Зростання розпірних зусиль збільшує сили тертя між напівфабрикатом і прес-формою, погіршує пропресовування, збільшує необхідні осьові зусилля пресування. Структура матеріалу характери-

зується великою кількістю утворень типу «арок» і «місточків», що визначають значну пористість заготовки [10, 16].

Для руйнування такої структури і подальшого підвищення щільності порошку при статичному пресуванні необхідно збільшити тиск пресування до критичних значень порядку 100...200 МПа. Однак для непластичних порошків з малою кількістю пластифікаторів і сполучних добавок навіть такі тиски не дозволяють отримати достатню щільність матеріалу і хороше пропресовування заготовки по висоті.

Вібраційний вплив на «скелет» напівфабрикату дозволяє отримати більш щільне рівномірне укладання частинок за рахунок усунення дефектів структури, чому сприяє часткове обливання зерен порошку в процесі обробки. Ефект поліпшення якості напівфабрикату пов'язаний з нижче викладеним.

По-перше, під дією вібрації істотно знижується коефіцієнт тертя між порошком і стінками прес-форми, що зменшує перепади пресового тиску по висоті заготовки [51].

Цьому сприяє «вичавлювання» рідкої фази (зв'язки, пластифікатора) на поверхню контакту матеріал-прес-форма внаслідок руйнування, під дією вібрації, оболонок навколо часток порошку.

По-друге, відбувається зниження внутрішнього тертя в матеріалі, про що свідчить зростання коефіцієнта бокового розпору, і зменшуються значення граничних напружень зсуву. Якщо інтенсивність вібраційного впливу перевищує певний рівень, то в матеріалі виникають циклічні зсувні деформації часток порошку завдяки більш ефективному упакуванню.

Проведені експерименти з одностороннього пресування циліндричних заготовок з нітриду кремнію показали нижчевикладане [75]. Для заготовки з відношенням висоти до діаметра $h/d=1,4$ відношення тисків на рухомому пуансоні і дні прес-форми при вібропресуванні склало 1,7 проти 5 для статичного пресування (тиск пресування до 20 МПа).

Середнє, за час навантаження, значення коефіцієнта бокового розпору збільшилося з 0,45 до 0,75, а максимальні значення досягли 0,9...0,95.

Ударний (імпульсний) періодичний силовий вплив на «скелет» напівфабрикату сприяє інтенсивному руйнуванню його тимчасових утворень – "арок" і "місточків", – оскільки у кожен момент дискретно-

го навантаження напівфабрикату змінюються його фізико-механічні властивості. Наприклад, при ущільненні напівфабрикату порошкового матеріалу в 1,6, .. 1,8 раза (за відношенням значень кінцевої і початкової площин) його жорсткість може відрізнятись в десятки разів. У зв'язку з тим, що при віброударному пресуванні кожен удар (імпульс) кінцевої тривалості містить пакет моногармонічних імпульсів зовнішніх сил у вигляді косинусоїдальних (або синусоїдальних) хвиль з кутовими частотами, що лежать в діапазоні, в «скелеті» напівфабрикату при проходженні хвиль будуть виникати резонансні явища на частотах цього діапазону, що сприяють руйнуванню його «арок» і «містків» і більш щільному укладанні частинок порошкового матеріалу [10, 16].

Режими вібронанвантаження є дуже важливим фактором, оскільки визначають ефективність розглянутих способів. Неправильне призначення режимів може призвести до «віброкіпіння» та сегрегації частинок при віброущільненні порошкового матеріалу. Як наслідок це може призвести до значних перепадів щільності в напівфабрикаті через перепресування матеріалу в одній частині прес-форми і розущільнення в іншій.

Режим вібронанвантаження можна охарактеризувати таким чином:

- за характером вібраційного впливу, як моногармонічний з постійними або змінними в часі параметрами, та імпульсний, що являє собою періодичний вплив несиметричної форми. Останній може бути поданий у вигляді суми моногармонічних сигналів, частота і амплітуда яких визначаються параметрами імпульсу;
- за інтенсивністю вібронанвантаження – енергією коливань за один період;
- за тривалістю – часом вібронанвантаження.

На сьогодні можна вважати доведеним більш високу ефективність віброударних режимів у порівнянні з чисто гармонічними вібраційними також і для пластичних порошкових матеріалів.

1.4 Вібропресове обладнання для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів

Підвищення вимог, пов'язаних з реалізацією різних технологічних процесів виробництва, вимагає створення необхідного вібраційного

обладнання та машин. Структурна схема технологічного процесу, вибір типу приводу, компоновальне рішення машини приймаються на стадії ескізного проекту й уточнюються при розробці технічної пропозиції. На цих стадіях закладаються передумови якості устаткування, що розробляється, та його техніко-економічні показники.

Спеціальне обладнання, що застосовувалося або застосовується для реалізації вібраційних способів пресування порошкових матеріалів, обумовлено не тільки різними варіантами рекомендованих схем навантаження заготовки при обробці [43, 64, 109], але й різноманіттям типів приводів механізмів генерування вібрацій, чи віброзбуджувачів [34, 63]. Найрозповсюдженішим є обладнання з механічним [38], гідравлічним [91] і комбінованим [16] типами приводу віброзбуджувача робочої ланки машини, що розташовується над (зверху) або під (внизу) об'єктом обробки. Підведення енергії до робочої ланки забезпечується елементом, середовищем або полем в залежності від використаного енергоносія. Спеціальне обладнання для вібраційного пресування доцільно класифікувати за типом приводу як вібраційні преси [67], які є машинами для обробки матеріалів тиском із застосуванням корисних вібрацій. У зв'язку з тим, що процес формоутворення заготовок у замкненому об'ємі прес-форми відбувається під дією зовнішніх сил тиску [119], що мають постійну та змінну складові, то це викликає зміну внутрішніх напруг та об'ємних деформацій. Аналіз принципів і конструктивних схем вібраційного обладнання, а також можливостей його застосування для реалізації процесів формоутворення заготовок з порошкових виробів доцільно провести на прикладах вібраційних пресів, використовуваних у промисловості з метою здійснення різних вібраційних технологій обробки матеріалів тиском.

Всі відомі вібраційні преси компонуються за традиційною схемою одно- або двостоякового виконання, з верхнім або нижнім розташуванням приводу головної робочої ланки, оснащеного віброзбуджувачем, що задає параметри технологічних режимів вібраційного навантаження.

Вібраційні преси (рис. 1.2) з механічним приводом вібрацій створюються на базі звичайних, частіше гідравлічних, пресів з верхнім розташуванням робочої ланки шляхом додаткового оснащення їх кінематичним ексцентриковим або відцентровим віброзбуджувачем 1,

установленим на рухомій поперечині [103, 106] або нерухомій поперечині (столі) преса [103, 127].

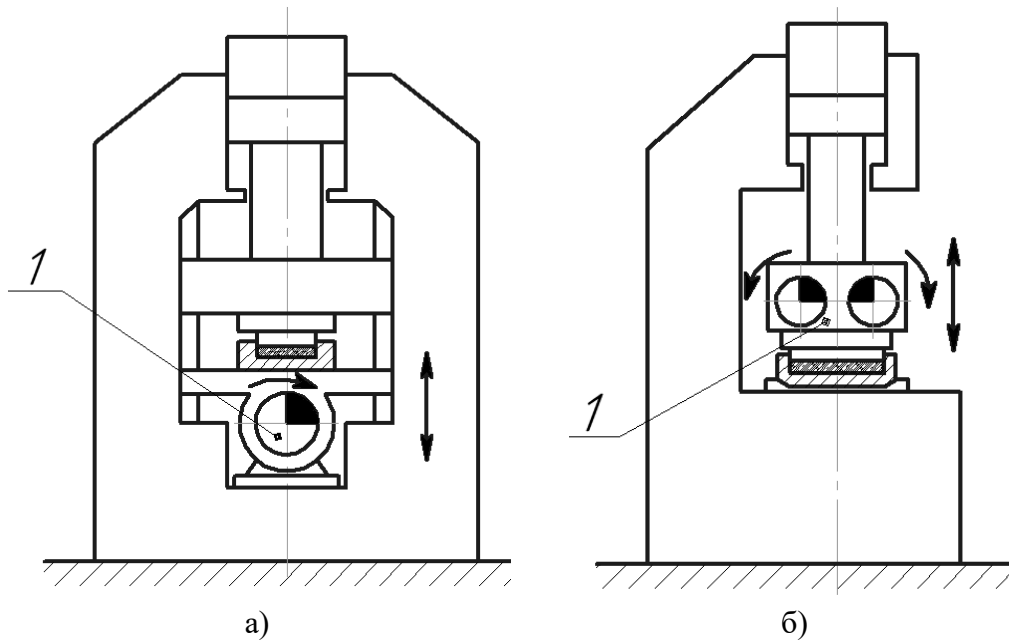


Рис. 1.2. Принципова схема вібраційного преса з механічним нижнім (а) та верхнім (б) розташуванням привода вібрацій

При встановленні на пресі кінематичного віброзбуджувача ексцентрикового типу (рис. 1.3) між його ексцентриковим приводом (Δ – ексцентриситет) 1 і робочою ланкою 3 знаходиться пружний елемент 2, що усуває накладання жорстких зв'язків на систему «віброзбуджувач – стіл преса».

У відцентрових віброзбуджувачах (рис. 1.4) дані жорсткі зв'язки відсутні і примусова сила $F_{in} = m\omega^2 r$ створюється в разі обертання з кутовою швидкістю ω неврівноваженого інерційного елемента,

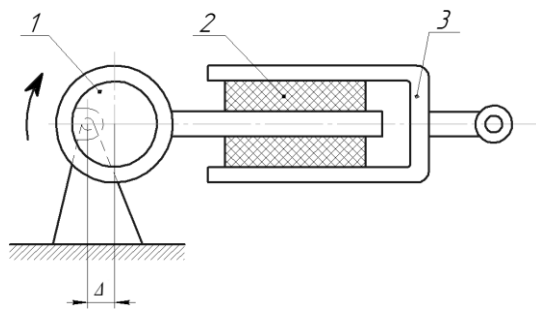


Рис. 1.3. Віброзбуджувач кінематичний ексцентрикового типу з пружним елементом

наприклад, дебаланса 1 масою m , жорстко зв'язаного з валом 2 (на відстані r від вісі обертання валу), підшипники якого встановлені в корпусі віброзбуджувача 3, а (або) в разі переміщення бігунка 1 по біговій доріжці 2 корпусу 3, яке передається від повідка 4 в результаті обертання вала 5 (рис. 1.4, б). За типом інерційного елемента

відцентрові вібробудувачі одержали назву, відповідно, дебалансних (рис. 1.4, а) і планетарних (рис. 1.4, б) [34].

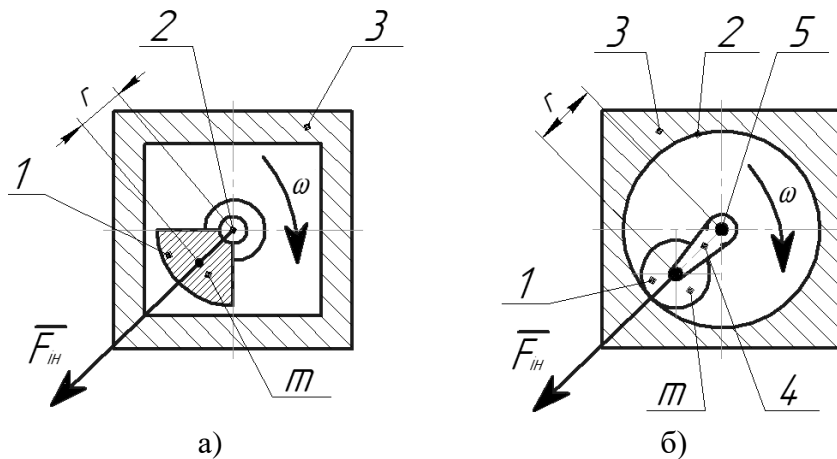


Рис. 1.4. Відцентрові дебалансні (а) та планетарні (б) вібробудувачі

Найбільше поширення в умовах виробництва одержали переважно двовалові дебалансні вібробудувачі [112], застосування яких дозволяє розвантажити конструкцію преса від бокових складових примусової сили. Схема вібраційного преса для пресування вогнетривів показано на рисунку 1.5.

Прес оснащується різними за потужністю і примусовою силою

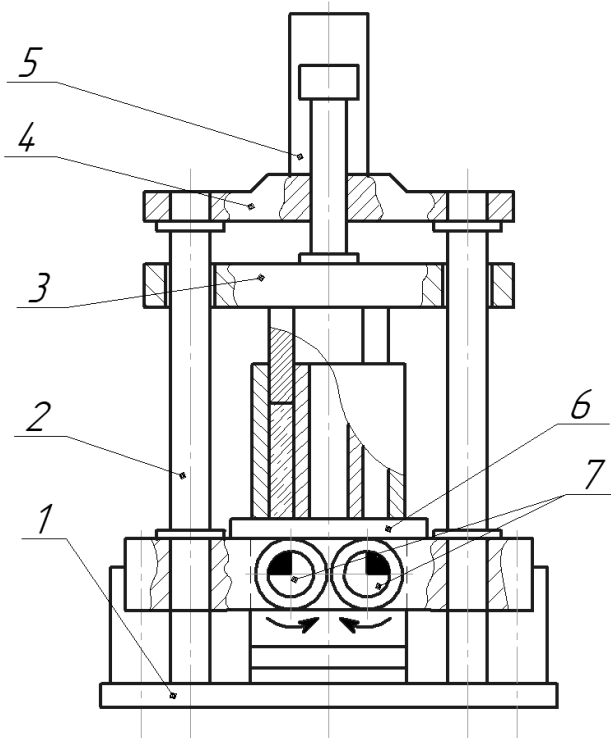


Рис. 1.5. Вібраційний прес з дебалансним приводом

уніфікованими блоками двовалових дебалансних вібробудувачів і успішно застосовується для пресування особливо складних фасонних вогнетривких виробів [40, 85]. Він містить станину у вигляді замкненої силової рами, що складається з основи 1, напрямних колон 2 і архітрава 4, на якому закріплений гідроциліндр 5 установних переміщень рухомої поперечини 3. Стіл 6 оснащений двоваловим дебалансним вібробудувачем 7, що приводиться в обертання електродвигу-

нами за допомогою карданних передач (на схемі не показані).

На практиці знайшли застосування вібраційні преси моделей ВП-3, ВП-4, ВП-5, що розвивають максимальне робоче зусилля 11,8 тс (116 кН) при частоті коливань столу 50 Гц з амплітудою $4 \cdot 10^{-3}$ м і оснащені приводом потужністю 20 кВт. Простота конструкції пресів ВП, а також доступність серійного випуску дебалансних віброзбуджувачів з робочим зусиллям до 24 тс (236 кН) багато в чому визначила досить широке їхнє роз-повсюдження, не зважаючи на високий рівень шуму, необхідність надійної віброізоляції у вигляді масивного фундаменту, низьку експлуатаційну надійність через наявність великої кількості недовговічних елементів вібраційного приводу (карданної передачі, підшипників дебалансних валів, синхронізаторів), відсутність можливості регулювання параметрів віброзбуджувача а, отже, і зміни технологічних режимів пресування.

Вібраційне обладнання з електричним приводом призначено, головним чином, для лабораторій, експериментальних цехів науково-дослідних інститутів та промислових підприємств, що відпрацьовують рекомендації для практичного застосування нових високоефективних способів вібраційного пресування. На даному обладнанні використовуються електричні віброзбуджувачі, що за принципом дії підрозділяються на магнітні та динамічні [34].

Вібраційні преси з гідравлічним приводом [16], створені на базі звичайних одно- і двостоякових пресів з верхнім або нижнім розташуванням приводу робочої ланки, що забезпечують одностороннє періодичне навантаження заготовки.

Відомі розробки гідравлічних вібраційних пресів для двостороннього пресування [13], але практичного застосування вони не знайшли. В усіх схемах компоновання вібропреса коливання його робочої ланки здійснюються безпосередньо за рахунок періодичної зміни тиску в порожнині робочого циліндра 2, створюваної гідравлічним віброзбуджувачем 3. Використання в приводі робочої ланки гідравлічних віброзбуджувачів різних типів визначило широке різноманіття типів гідравлічних вібропресів, розроблених і створених рядом проектно-конструкторських і науково-дослідних організацій.

Всі типи гідравлічних віброзбуджувачів, що знайшли застосування або були випробувані в приводах вібраційних пресів, створених на

базі звичайних гідропресів, запропоновано [34] класифікувати на пульсаторні (рис. 1.6) та автоколивальні (рис. 1.7).

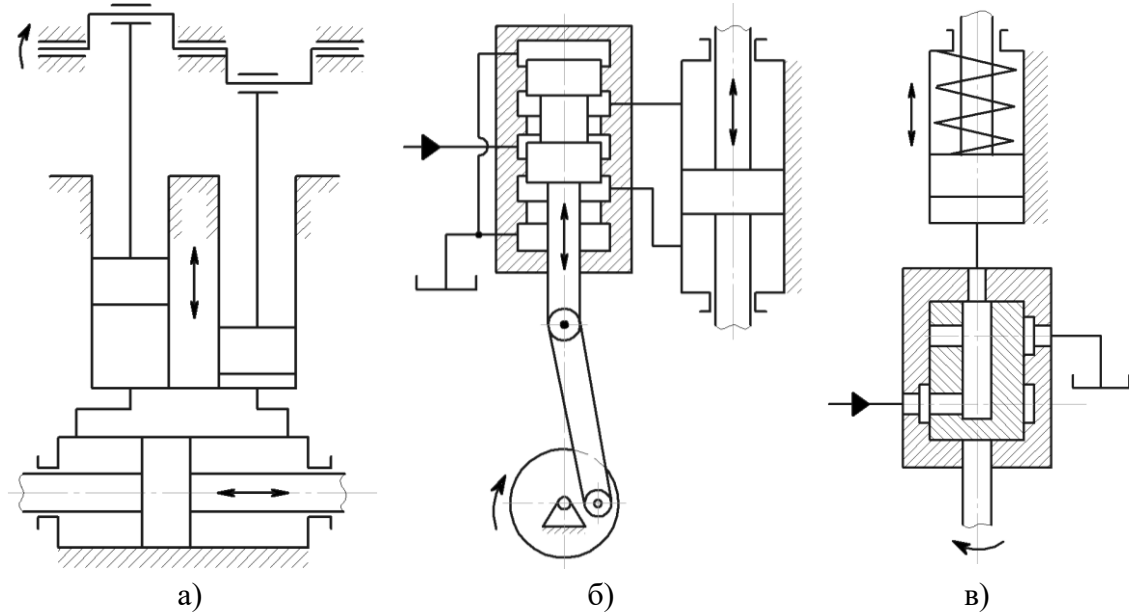


Рис. 1.6. Типові схеми пульсаційних віброзбуджувачів:
 а – насосний; б – золотниковий; в – золотниково-втулковий

З точки зору надійності експлуатації, технологічності і можливості реалізації заданих параметрів навантаження, для вібраційних гідравлічних пресів найпридатнішими є автоколивальні віброзбуджувачі із зазором у механічному зворотному зв'язку між розподільним елементом та сервоклапаном [66], а також з гідравлічним зворотним зв'язком за перепадом тиску [68, 89, 91].

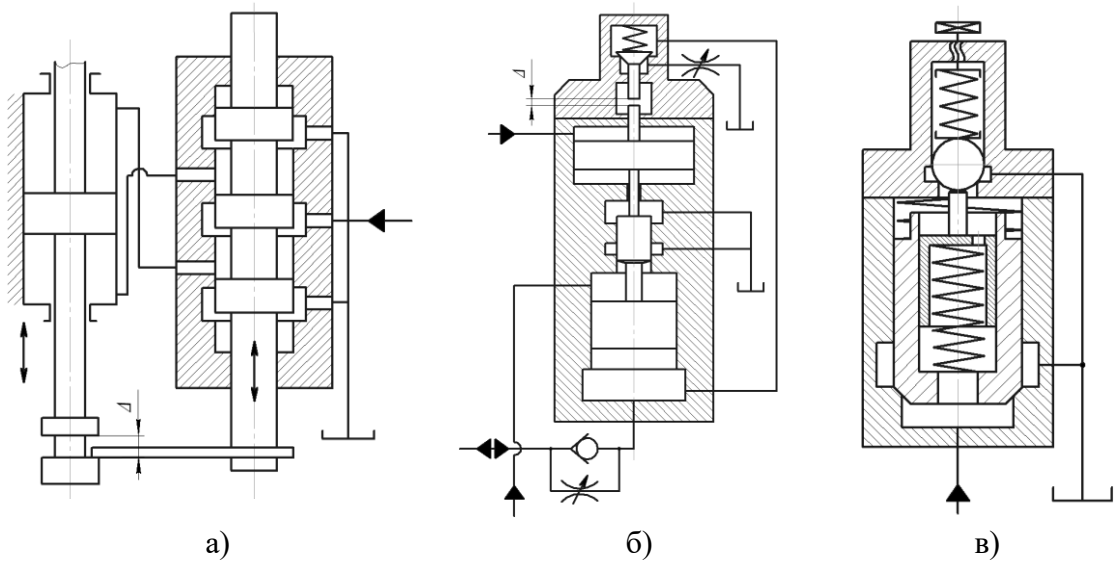


Рис. 1.7. Конструктивні схеми автоколивальних віброзбуджувачів:
 а – гідромеханічного; б – пульсаційного; в – «клапана-пульсатора»

На рисунку 1.8 показана схема преса пульсаційного навантаження типу ППН [80]. В нижній частині його двостоякової станини 1 розміщений привод ланки 2, що діє на заготовку, розміщену в рознімному штампі 3. За допомогою пульсатора 4 у порожнині робочого гідроциліндра створюється тиск, що періодично змінюється і викликає вібраційні переміщення робочої ланки преса.

Преси моделей ППН-100 (з верхнім приводом) і ППН-315 (з нижнім приводом), з робочим зусиллям відповідно 98 тс (960 кН) і 308 тс (3 МН), використовувалися для калібрування труб і профілів з легких сплавів [88].

Принципово новим рішенням вібраційних пресів виявилися гідроінерційні преси типу ГП. За способом створення робочого зусилля на заготовці вони істотно відрізняються від вібраційних пресів, створених на базі звичайних гідропресів.

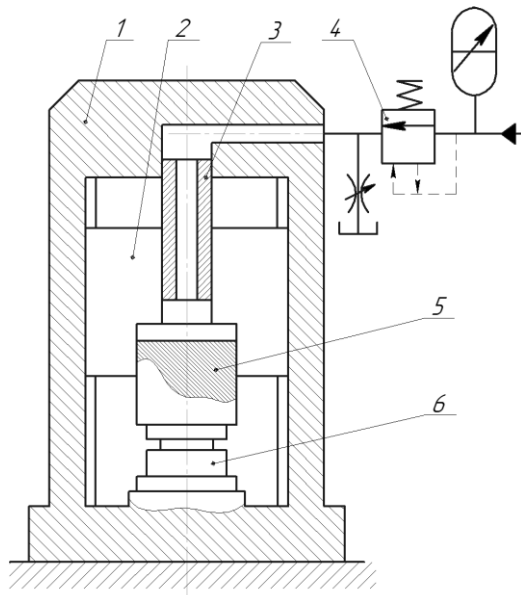


Рис. 1.9. Гідравлічний інерційний прес

На рисунку 1.9 показана схема гідроінерційного преса [68], у якого плунжер 5 забезпечує на заготовці 6 динамічне зусилля, обумовлене періодичним генеруванням у порожнині робочого гідроциліндра (його корпусом служить рухома відносно станини 1 інерційна маса 2) імпульсів тиску рідини, що подається через клапан-пульсатор 4 і телескопічний трубопровід 3.

За результатами проведених на пресах ГП експериментів переваг інерційної схеми навантаження відзначено не було.

З урахуванням вимог, що висуваються до способу формоутворення заготовок з карбідокремнієвих порошкових матеріалів, у Вінницькому національному технічному університеті, на замовлення Броварського Заводу Порошкової Металургії [112], був створений новий тип гідравлічних інерційних вібропрес-молотів [3]. ІВПМ показаний на рисунку 1.10.

Дослідно-промислова експлуатація ІВПМ [41, 96], створених за результатами досліджень автора [65], показала універсальність даного

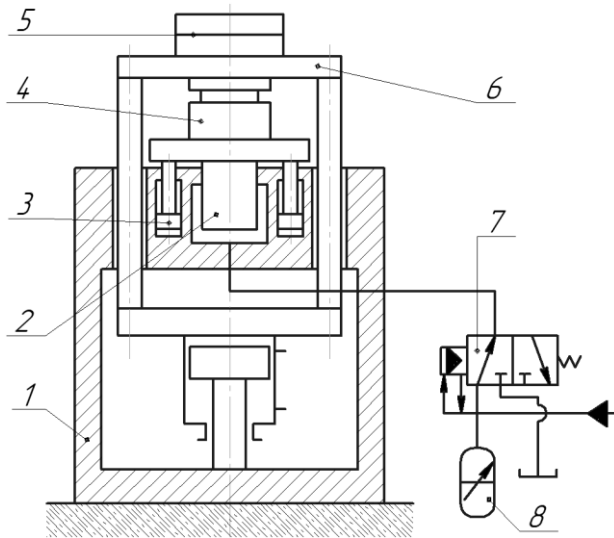


Рис. 1.10. Конструктивна схема ІВПМ

обладнання при здійсненні пресування заготовок складної конфігурації і великих габаритів з карбідокремнієвих порошкових матеріалів, його високу ефективність і виявила необхідність проведення подальших робіт із забезпечення широкого промислового впровадження ІВПМ.

В роботах багатьох авторів [5, 6, 75, 77] досліджені переваги і недоліки машин з різними типами приводів.

Різноманітність типів приводів [29, 8, 9] пояснюється багатьма технічними вимогами, які висуваються до них. З урахуванням специфіки вібраційного устаткування виробництва, це, насамперед, достатня потужність для даної технологічної операції, можливість та простота плавного регулювання частоти, амплітуди і форми коливань у діапазоні технологічних вимог; стабільність робочих характеристик у межах встановленого допуску, при зміні маси технологічного навантаження; доступність (виготовлення або придбання); економічність; довговічність та надійність експлуатації в несприятливих умовах (підвищена вологість, запилене повітря, мінімальне обслуговування тощо); зручність компонування з робочим органом машини [10].

Відомі різні типи приводів (механічні, електричні, пневматичні, гідравлічні), які у літературі фіксуються за різними ознаками [48, 28, 29, 68]. Сукупність висунутих вимог задовольняють не всі типи приводів, що забезпечують заданий рух робочих органів.

Застосування вібраційних машин, робоча ланка яких здійснює силовий вплив на об'єкт обробки з великою миттєвою потужністю, що значно перевищує встановлену потужність машини, дає можливість інтенсифікувати цілий ряд технологічних процесів (наприклад, ущільнення формувальних сумішей) [38]. Ці процеси здійснюються, як пра-

вило, на машинах із зворотно-поступальним рухом робочої ланки, що забезпечує періодичне високочастотне імпульсне навантаження.

Найбільш раціональним, як показала практика, для машин подібного типу є гідравлічний привод, який має такі переваги: висока питома потужність внаслідок застосування високого робочого тиску рідини (10 – 32 МПа), малі габарити і маса, що припадають на одиницю потужності, плавне незалежне регулювання в широкому діапазоні частоти й амплітуди вібрації робочого столу, можливість програмного керування режимами роботи, зручність компонування з робочими органами вібромашини, знижений шум у роботі, достатньо високий ККД [5].

Гідравлічний і пневматичний приводи вібраційних і віброударних машин за принципом дії аналогічні, проте останній має обмеження при необхідності створення значних потужностей і зусиль через збільшення габаритних розмірів приводу та машини в цілому. Крім того застосування гідравлічного приводу дозволяє значно зменшити рівень шуму та запиленість повітря.

Як продовження розвитку вібраційних гідравлічних приводів було створено та досліджено новий тип приводу, що в подальшому отримав назву гідроімпульсного [11]. Цей привод вперше знайшов застосування на вібропресах ІВПМ. Основи теорії розрахунку гідроімпульсного приводу технологічних машин розглянуті в роботах [35, 48, 102, 114].

Проведений аналіз переваг та недоліків різних типів приводів, що застосовуються для збудження вібрацій робочих органів машин обробки тиском, дозволяє довести найбільшу ефективність гідроімпульсного приводу з точки зору незалежного регулювання параметрів вібрацій від максимального робочого зусилля на об'єкті деформування та величини енергії, яка витрачається на здійснення робочого ходу. Крім вищезгаданих переваг, гідроімпульсний привод просто і надійно забезпечує установчі та допоміжні переміщення в машині, які передбачені технологічним процесом.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІБРОУДАРНОГО ПРЕСУВАННЯ

2.1 Фізико-механічні властивості заготовок під віброударним пресуванням

При виготовленні форм серед динамічних методів ущільнення для складних виливків особливий інтерес становлять методи вібраційного і віброударного навантаження. Розрізняють вібропресування, при якому опока із сумішшю робить гармонічні або полігармонічні коливання, і розрізняють віброударне пресування, коли вібрація супроводжується ударними навантаженнями.

Багато робіт присвячено вивченню механізму ущільнення і поведіння формувальних сумішей при дії вібродинамічних навантажень [18, 24, 40]. Ці дослідження показали підвищення середньої щільності суміші при впливі вібрації. Це є зниженням внутрішнього тертя і сил зчеплення між частинками, що зменшує ефективну в'язкість суміші [12].

Проведений ряд досліджень з ущільнення частинок порошкового матеріалу в контейнері прес-форми закритого типу при пресуванні за схемою інерційного навантаження [75], спрямованих, в першу чергу, на вивчення характеру зміни фізико-механічних властивостей заготовок при їх дискретному навантаженні. Були проведені дослідження [83, 103, 108], що дозволили зробити ряд узагальнень, які характеризують фізико-механічні властивості заготовок і визначають тенденції створення і розвитку нового спеціального устаткування [75].

На графіку $F_z - \Delta h$ (рис. 2.1) розглянуто стадії деформації заготовки, де умовно виділили три основні ділянки (I ділянка – OA, II – AB і III – BC), розміри яких визначаються параметрами і складом пресованого порошкового матеріалу, а також характером взаємодії частинок його структурної основи [75]. На першій ділянці графіка $F_z - \Delta h$ (ділянка кривої OA) навантаження заготовок від 0 до $F_{за}$ в прес-формі характеризується зближенням твердих частинок основи, заповненням вільного простору в об'ємі прес-форми пластифікатором, витісненням повітря в зазори між матрицею і пуансоном.

До виникнення контакту між твердими частинками процес деформування заготовки в замкненому об'ємі прес-форми основи супрово-

джується збільшенням поточного значення густини порошкового матеріалу заготовки і відбувається в умовах в'язко-пластичної течії. При цьому незначні зусилля $0 \leq F_{zli} \leq F_{za}$ викликають відносно великі абсолютні деформації $h_{li} \leq h_A$, величина яких визначається гранулометриєю частинок основи порошкового матеріалу, процентним вмістом пластифікатора та в'язучих домішок. Межею ділянки I слід вважати абсолютну деформацію заготовки h_A , яка досягається в початковий момент утворення вихідного «скелета» основи у вигляді складних просторових

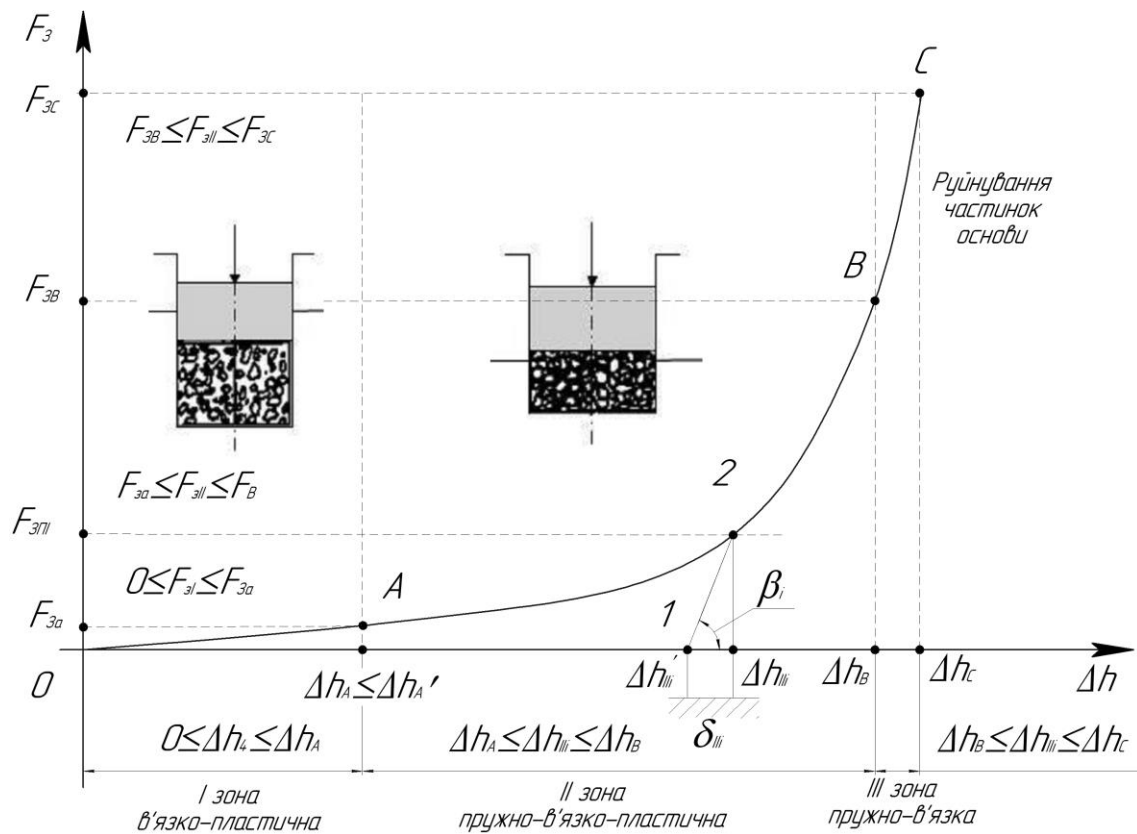


Рис. 2.1. Діаграма звичайного пресування заготовок з порошкових матеріалів

структур «арок», «містків», «ланцюжків» [16, 18, 78, 98] при виникненні контактів між її твердими частинками. Відсутність пружних складових внутрішніх напруг в структурі заготовки під час її пресування дозволяє вважати дані абсолютної деформації незворотніми, тобто, незалежно від величини зусилля $F_{zli} (0 \leq F_{zli} \leq F_{za})$, досягнута в процесі навантаження абсолютна деформація $\Delta h_{li} (0 \leq \Delta h_{li} \leq \Delta h_A)$ залишається незмінною і після розвантаження від F_{li} до 0. Така поведінка пресованого матеріалу подібна пластичній деформації і в заготовці не спостерігається пружна післядія – зменшення величини досягнутої

абсолютної деформації Δh_{II} при знятті зовнішнього навантаження F_{zII} [75].

Ділянка II є найхарактернішою для графіка $F_z - \Delta h$, що відповідає кривій АВ. Межі цієї ділянки визначаються зміною зусилля навантаження заготовки F_{zIII} від F_{za} до $F_{zб}$ ($F_{za} < F_{zIII} \leq F_{zб}$) і абсолютної деформації Δh_{III} від Δh_A до Δh_B ($\Delta h_A < \Delta h_{III} \leq \Delta h_B$). Процес деформування пресованого порошкового матеріалу заготовки на ділянці кривої АВ відбувається в замкненому об'ємі прес-форми за наявності пружних і крихких контактів між частинками «скелета» основи, що виникають в результаті утворення складних просторових структур.

Зростання числа описаних складних просторових структурних утворень на початковій стадії навантаження заготовки зусиллям F_{zIII} відбувається за рахунок зближення частинок основи порошкового матеріалу (без істотного руйнування їх контактів), що супроводжується збільшенням абсолютної деформації заготовки Δh_{III} , взаємним проникненням та зсувом не заклиненних твердих частинок основи у вільні зони і простори, заповнені пластифікатором або зв'язкою. Зі зростанням зусилля F_{zIII} відбувається руйнування старих і зародження нових складніших структурних утворень з великим числом контактів між частинками. Описаний ділянкою кривої АВ процес деформування заготовки, супроводжується також локальним руйнуванням крупніших частинок основи. Величина досягнутої абсолютної деформації заготовки Δh_{III} на ділянці II в процесі навантаження не зберігає свого значення після зниження зусилля, що діє від F_{zIII} до 0. Остаточне значення абсолютної деформації заготовки після розвантаження Δh_{III}^I менше досягнутого в процесі навантаження до зусилля F_{zIII} на величину пружної післядії:

$$\delta_{III} = \Delta h_{III} - \Delta h_{III}^I. \quad (2.1)$$

Про пружно-в'язко-пластичні властивості заготовки свідчить наявність пружних складових деформації, що проявляються на даному етапі пресування, а закономірність їх прояву можна обґрунтувати еволюцією структурних змін в заготовці. Наприклад, різкому збільшенню пружної післядії зі зростанням зусиль навантаження повинно відповідати інтенсивне зародження нових складніших структурних утворень з великою кількістю пружних контактів між частинками основи в матеріалі заготовки.

Наявністю сталих пружних контактів між частинками основи визначається лінійна ділянка III кривої навантаження $F_3 - \Delta h$ (відрізок ВС). Дана ділянка свідчить про в'язко-пружні властивості заготовки і визначається величиною діючого зусилля $F_{зIII} = F_{зс}$, перевищення якого викликає крихке руйнування і перехід в більш дрібну дисперсну фазу непластичних частинок основи порошкового матеріалу, що мають певну межу міцності. Навантаження заготовки зусиллями $F_{зIII}$ ($F_{зс} < F_{зIII} < F_{зс}$) недоцільне, оскільки значення остаточної абсолютної деформації $\Delta h_{III}^I = \Delta h_B^I$ на цій ділянці залишається практично незмінним при зростанні поточного значення абсолютної деформації Δh_{III} ($\Delta h_B < \Delta h_{III} \leq \Delta h_C$). Навантаження заготовки зусиллями більшими F_c дозволяє дещо збільшити її остаточної абсолютну деформацію а, отже, і густину, але, внаслідок руйнування частинок основи після термообробки, істотно змінюються фізико-механічні властивості виробу, наприклад, пористість [17].

Згідно з графіком $F_3 - \Delta h$ (рис. 2.1), що визначає силовий режим роботи пресової машини, найефективніше навантаження заготовки – ділянки I та II (ОА і АВ). Причому, найбільша частина повної роботи пресування заготовки:

$$A = \int_0^{\Delta h_B} F(\Delta h) d(\Delta h) = \int_0^{\Delta h_A} F(\Delta h) d(\Delta h) + \int_{\Delta h_A}^{\Delta h_B} F(\Delta h) d(\Delta h), \quad (2.2)$$

витрачається на ділянці II в разі збільшення поточного значення абсолютної деформації заготовки від Δh_A до Δh_B . Корисна робота пресування заготовки A_k з урахуванням пружної післядії, визначається за формулою:

$$\begin{aligned} A_k &= A - A_y = \int_0^{\Delta h_B} F(\Delta h) d(\Delta h) - \int_{\Delta h'_B}^{\Delta h_B} F(\Delta h) d(\Delta h) = \\ &= \int_0^{\Delta h'_B} F(\Delta h) d(\Delta h), \end{aligned} \quad (2.3)$$

де A_y – робота пружного стискання заготовки.

Для попереднього відтворення умов дискретного навантаження заготовок з непластичних порошкових матеріалів при віброударному режимі пресування, з метою вивчення характеру зміни їх фізико-механічних властивостей, було проведено звичайне пресування заготовок багаторазовим навантаженням і з повним розвантаженням [75].

Основні особливості зміни фізико-механічних властивостей заготовок, при дискретному багаторазовому навантаженні, були також відзначені для основних інерційних режимів навантаження тих же заготовок під впливом періодичних імпульсів зовнішніх сил [69].

Найефективнішим режимом інерційного навантаження заготовок з непластичних порошкових матеріалів є режим ударно-вібраційний (УВ), який забезпечує досягнення однакових величин остаточних абсолютних деформацій при зусиллях значно менших (в 2,5...10 раз), ніж відповідні даним деформаціям зусилля звичайного пресування. Особливість даного режиму УВ полягає в тому, що зростання деформації заготовки на остаточній стадії пресування відбувається при практично постійній величині імпульсних навантажень, що прикладаються до неї.

Визначена закономірність збереження заготовкою однакових пружних властивостей, для циклів зі сталим режимом навантаження при одноразовому силовому впливі, дозволяє в загальному випадку, значно спростити динамічний аналіз рухомих ланок машини, що забезпечують інерційне навантаження заготовок при віброударному пресуванні. При цьому механічні властивості відпресованої заготовки будуть однозначно визначатись відповідним коефіцієнтом умовної жорсткості c_3 , який використовується при поданні зусилля на заготовці у вигляді лінійної залежності:

$$F_{zi \max} = c_3 (x_1 - x_2) = c_3 \Delta x, \quad (2.4)$$

Для циклів з нестійким режимом навантаження в процесі пресування, закономірність зміни механічних властивостей заготовки при зближенні робочої ланки і вантажу на величину Δx_i , може бути подана наближеною залежністю:

$$F_{zi} \approx F_{z(i-1)} + K_{\alpha i} \Delta_i, \quad (2.5)$$

де i – номер циклу навантаження; $F_{z(i-1)}$ – максимальне зусилля попереднього циклу навантаження; $K_{\alpha i} = tg \alpha_i$ – коефіцієнт «пластичності» [40] заготовки при i -му циклі навантаження [75].

При розвантаженні заготовки від дії інерційного вантажу характер зміни зусилля може бути описаний лінеаризованою залежністю:

$$F_{zi} = c_{\beta i} (\Delta x_i - \Delta_i), \quad (2.6)$$

де Δ_i – величина залишкової пластичної деформації заготовки, забез-

печуваної при i -му циклі навантаження; $c_{\beta_i} = \operatorname{tg} \beta_i$ – умовний коефіцієнт механічної жорсткості заготовки при i -му циклі навантаження.

З позицій структурного аналізу самої заготовки, слід розглянути можливість додаткового пластичного деформування заготовок, які при одноразовому навантаженні проявляють тільки пружні властивості, що складається з безлічі непластичних частинок основи. До цього висновку можна прийти, якщо звернути увагу на випадковий характер дискретного зростання пластичної деформації заготовки в сталому режимі навантаження. Саме структурний аналіз дозволить встановити взаємозв'язок між фізико-механічними властивостями заготовки з непластичних порошків та параметрами ударно-вібраційного режиму її навантаження, на основі якого можна обґрунтувати високу ефективність даного режиму і сформулювати основні положення теорії процесу віброударного пресування заготовок при інерційній схемі навантаження.

2.2 Інерційний вібропрес-молот з гідроімпульсним приводом

Дослідження інерційного вібропрес-молота створеного за результатами досліджень авторів [112], показало універсальність даного обладнання при здійсненні пресування заготовок складної конфігурації і великих габаритів з карбід-кремнієвих порошкових матеріалів, його високу ефективність і виявило необхідність проведення подальших робіт із забезпечення широкого промислового впровадження ІВПМ. Усі конструкції ІВПМ мають загальну структуру, в якій доцільно виділити два виконавчих механізми, що забезпечують переміщення рухомої поперечини зі змінними масами інерційних вантажів та періодичні коливання робочого столу машини. Вказані механізми мають, відповідно, допоміжний та основний приводи (ДП, ОП) ІВПМ. В якості допоміжного використовується насосний безакумуляторний привід, подача якого постійна, а в якості основного – гідроімпульсний привід, що забезпечує зміну тиску в робочій порожнині гідроциліндра або гідродвигуна поворотної дії згідно із певною періодичною закономірністю, яка визначається тим, як підключений вібробуджувач [75]. Виконавчі механізми ІВПМ розташовуються на верхній та нижній нерухомих поперечинах станини, остання з яких звичайно закріплена на блоці віброізолюваного фундаменту [68].

Вказані особливості структури ІВПМ дозволяють вважати, що його конструкція в загальному випадку містить станину з блоком фундаменту та змонтованими на ній корпусами гідродвигунів виконавчих механізмів; робочий стіл, жорстко закріплений на плунжері гідродвигуна основного приводу машини; рухому поперечину зі змінними масами інерційних вантажів, жорстко закріплену на штоці гідродвигуна допоміжного приводу.

Технологічне оснащення ІВПМ кріпиться на робочому столі (контейнер прес-форми) та рухомій поперечині (пуансон).

Процес ВУП на ІВПМ залежить від характеру динамічної взаємодії його рухомих ланок, в результаті якого заготовка піддається впливу робочого навантаження. Взаємодія починається під час ходу наближення рухомої поперечини до зіткнення з робочим столом, яка у вихідному положенні нерухома. В процесі даного переміщення рухома поперечина взаємодіє з станиною, а під час гальмування (з моменту зіткнення пуансона з заготовкою) – ще з робочим столом. Хід наближення рухомої поперечини завершується попереднім деформуванням заготовки в контейнері прес-форми, закріпленому на робочому столі. Граничне значення зусилля попереднього деформування відповідає силі ваги рухомої поперечини, маса якої встановлюється в залежності від величини припустимого питомого зусилля [43] на поверхні заготовки з боку пуансона, закріпленого на рухомій поперечині.

Робочий хід та деформування заготовки починаються після відключення допоміжного приводу та вмикання основного, який створює в робочій порожнині гідродвигуна тиск, що періодично змінюється. Закон зміни даного тиску $p_y(t) = p_y(t + t_y)$ визначається в залежності від варіанту підключення вібробуджувача ГПП.

Аналізуючи конструктивні схеми ІВПМ та взаємодії їхніх рухомих ланок, з урахуванням особливостей використання основного і додаткового гідроприводів, у Вінницькому національному технічному університеті на рівні із іншими відомими розробками [69, 109] було розроблено оригінальну конструкцію ІВПМ (рис. 2.2) [1, 5].

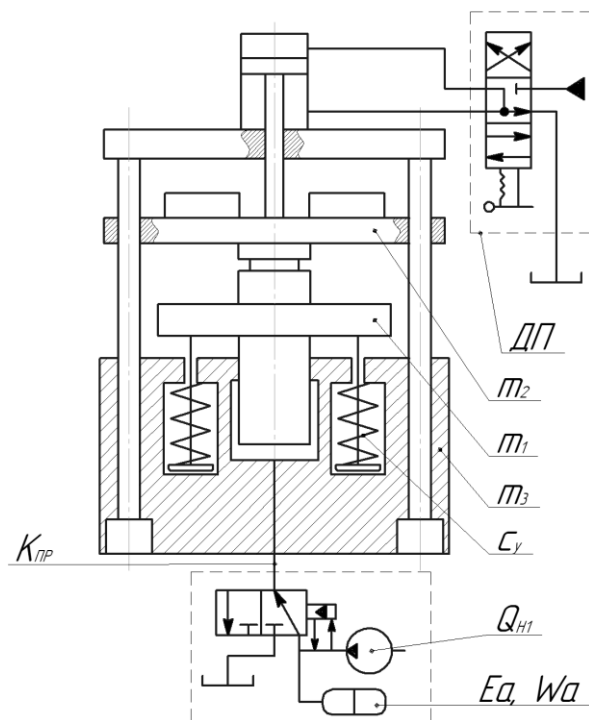


Рис. 2.2. Структурна схема ІВІМ:

E_a – енергія одноциклового гідроаккумулятора; W_a – об’єм гідросистеми; $K_{пр}$ – коефіцієнт пружності; $Q_{н1}$ – подача робочої рідини від насоса; p_1, p_2 – тиск спрацювання вібробуджувача; m_1, m_2, m_3 – маса рухомих ланок; c_y – жорсткість пружних елементів; $ОП$ – основний привод, $ДП$ – допоміжний привод

рухої поперечини в момент її підведення до заготовки. За рахунок сил ваги рухої поперечини $m_{n,n}$, із закріпленими на ній змінними масами інерційних вантажів $m_{i,n}$ і пуансоном m_n , здійснюється попереднє деформування заготовки. При цьому робоча рідина від насоса перетікає на злив, і функції допоміжного приводу можна вважати виконаними. Після створення додаткового статичного притискання (досягнення в гідросистемі розрахункового тиску спрацювання запобіжного клапана p_N ($p_N > p_n$)) рухома поперечина зупиняється і надлишок робочої рідини, а також з поршневої порожнини гідроциліндра відводиться на злив через запобіжний клапан.

В ГІП при ввімкненому розподільнику напрям подачі робочої рідини від насоса залежить від схеми підключення вібробуджувача. При підключенні вібробуджувача «на вході», робоча рідина від насоса $Q_{н1}$ подається в порожнину одноциклового гідроаккумулятора з по-

В допоміжному приводі робоча рідина від насоса в залежності від положення золотника розподільника, надходить в поршневу або в штокову порожнину гідродвигуна. А з порожнин, відповідно, штокової та поршневої – на злив через підпирний клапан, налагоджений на тиск p_n . Такому переміщенню робочої рідини в допоміжному приводі відповідає поступальне переміщення штока гідроциліндра із закріпленою на ньому рухомою поперечиною масою $m_{n,n}$ в напрямку до оброблюваної заготовки масою $m_{заг}$ (вниз) або від неї (вверх).

Золотник розподільника перемикається в середнє положення після завершення встановлених переміщень ру-

чатковим об'ємом W_0 . При постійній подачі насоса $Q_{н1}$, в результаті стисливості робочої рідини і пружного деформування стінок гідроліній та порожнини гідроакумулятора, відбувається накопичення потенціальної енергії, що супроводжується підвищенням тиску в середовищі робочої рідини до величини $p_{a.max}$, що відповідає тиску p_1 налаштування спрацьовування вібробуджувача і з'єднання порожнини гідроакумулятора через гідролінію з робочою порожниною гідроциліндра основного приводу. Робоча рідина з початковим тиском $p_{a.max}$ з порожнини гідроакумулятора надходить в робочу порожнину гідроциліндра і передає накопичену потенціальну енергію рухомим ланкам ІВПМ для виконання робочого ходу при взаємодії з плунжером гідроциліндра, площа якого $S_{пл}$. Процес передачі енергії супроводжується змінами тиску в середовищі робочої рідини, яка знаходиться в порожнині гідроциліндра згідно із законом $p_{ц}(t)$, що визначається величиною енергії, швидкістю її передачі при спрацьовуванні вібробуджувача, характером деформування стінок гідролінії робочої порожнини гідроциліндра, і пружин пружного повернення, а також зміною сил опору руху плунжера з боку заготовки.

Рух мас плунжера, стола, контейнера, прес-форми та заготовки відбувається спільно. Періодичність даного руху залежить від характеру спрацьовування вібробуджувача.

В середовищі робочої рідини, що знаходиться в порожнині гідроакумулятора, при падінні тиску до величини $p_{a.max}=p_2$, яка відповідає величині тиску закриття вібробуджувача, відкривається доступ робочій рідини з порожнини гідроакумулятора. Робоча рідина з робочої порожнини гідроциліндра перетікає на злив, плунжер з приєднаними конструктивними елементами повертається у вихідне положення під дією сил ваги і стиснених пружин пружного повернення, еквівалентна жорсткість яких c_y . Одночасно робоча рідина подається від насоса $Q_{н1}$ в порожнину гідроакумулятора W_0 , внаслідок чого збільшується запас накопиченої потенціальної енергії, яка визначається величиною тиску p_a . При досягненні в підсистемі тиску $p_a=p_{a.max}=p_1$ спрацьовує вібробуджувач. Таким чином робоча рідина періодично надходить до порожнини гідроциліндра і створює в ній тиск.

Аналіз структурної схеми показує, що ІВПМ являє собою гідромеханічну систему, що складається з твердих елементів в поєднанні з рідинними елементами.

Вибір способу підключення вібробуджувача в ГПП вібропресового обладнання визначається заданим режимом інерційного навантаження і вимогами, що висуваються до параметрів генерованих імпульсів тиску робочої рідини. Для генерування ударних (миттєвих) імпульсів тиску доцільно використати спосіб підключення вібробуджувача «на вході», оскільки в цьому випадку тривалість імпульсів буде залежати, в першу чергу, від часу відкриття запірного елемента вібробуджувача на величину умовного проходу, що забезпечує подачу робочої рідини Q_{Σ} в порожнину гідроциліндра з допустимими втратами тиску на дроселювання [3], при заданій величині тиску p_1 налаштування його спрацьовування.

Важливою перевагою способу підключення вібробуджувача «на вході» слід також вважати можливість зміни енергії, що передається в порожнину гідроциліндра при незмінній тривалості генерованого імпульсу тиску, що дозволяє рекомендувати його для реалізації будь-якого режиму інерційного навантаження [75]. При підключенні вібробуджувача «на виході» тривалість генерованих імпульсів тиску залежить від параметрів гідросистеми, що визначають час набирання тиску до заданого значення p_1 . Використання такої схеми підключення вібробуджувача при необхідності генерування ударних імпульсів тиску із заданим амплітудним значенням p_1 вимагає значного збільшення потужності приводу, головним чином, за рахунок збільшення подачі насоса.

2.3 Основні робочі режими роботи ІВПМ

Робочий режим ІВПМ в процесі ВУП можна охарактеризувати сукупністю механічних параметрів перехідних процесів, які виникають в робочій рідині ГПП і при взаємодії рухомих ланок ІВПМ в результаті періодичного спрацьовування вібробуджувача [64].

Можливі співвідношення цих параметрів були встановлені на лабораторних вібропресах ІВПМ-1,5 [75, 119] та ІВПМ-5Л [53, 106]. Враховувались такі механічні параметри: переміщення робочого столу; переміщення рухомої поперечини; зусилля навантаження заготовки з боку інерційного вантажу; тиск в порожнині одноциклового гідроаккумулятора; тиск в порожнині привідного гідроциліндра.

Різний характер навантаження заготовки на ІВПМ-5Л забезпечувався збільшенням або зменшенням мас змінних інерційних вантажів, використанням додаткового статичного притискання, зміною подачі насоса і тиску налаштування спрацьовування вібробуджувача ГП. Дослідження робочих режимів ІВПМ проводилося для постійної умовної жорсткості заготовки, досягнутої після завершення процесу її формоутворення. Характер навантаження заготовки було описано у вигляді періодичного процесу з постійними амплітудними значеннями зусиль і спрощено задачу аналізу робочих режимів ІВПМ [75].

Відмінною ознакою для виділених робочих режимів є характер зміни зусилля навантаження заготовки, що визначається умовами взаємодії робочого столу з рухомою поперечиною. На ІВПМ реалізуються робочі режими, для яких навантаження заготовки відбувається практично двічі під дією одного імпульсу примусового тиску [75]. Перше навантаження відбувається одночасно з дією примусового імпульсу при спільному переміщенні робочого столу і рухомої поперечини до моменту відриву останньої від заготовки, а друге – при ударі рухомої поперечини об заготовку після завершення незалежного переміщення. Причому, між першим і другим навантаженнями заготовка знаходиться в розвантаженому стані. Між рухомою поперечиною і заготовкою можуть виникати згасаючі ударні взаємодії після другого навантаження, амплітудні значення яких залежать від маси рухомої поперечини з інерційним вантажем та кінцевої щільності заготовки, досягнутої в результаті її пресування. Зі збільшенням частоти проходження імпульсів тиску і маси змінних інерційних вантажів можна забезпечити навантаження заготовки на зустрічному ході робочого столу й інерційного вантажу. Даний робочий режим можливий за умови, що закінчення незалежного переміщення рухомої поперечини відбувається протягом часу переміщення вгору робочого столу, викликаного імпульсом тиску. Характер зміни зусилля на заготовці визначався тривалістю взаємодії з нею робочого столу і рухомої поперечини при їх спільному переміщенні після зіткнення. На іншому відрізку часу до моменту наступної взаємодії заготовка знаходиться у розвантаженому стані. Використання додаткового статичного притискання істотно впливає на характер зміни зусилля навантаження заготовки [75]. У початковий момент заготовка навантажена зусиллям $P_{ст}$. в момент початку імпульсу тиску зусилля на заготовці збільшується до

$F_{z.max} > P_{cm}$, а потім зменшується до $F_{z.min} < P_{cm}$ і знову набуває значення P_{cm} . Таке навантаження відповідає спільному (безвідривному) переміщенню рухомої поперечини і робочого столу, при якому можна нехтувати розвантаженим станом заготовки ($F_z = 0$).

Дослідження робочих режимів при підключенні до приводного гідроциліндра ІВПМ-5Л віброзбуджувача за схемою «на виході» проводилося за методикою запропонованою для ІВПМ із віброзбуджувачем «на вході» [75]. Перехідні процеси в робочій рідині ГПІ у зв'язку з відсутністю гідроакумулятора в даній схемі підключення розглядалися за допомогою одного механічного параметра, який характеризує тиск у порожнині гідроциліндра.

Періодичність зміни тиску в порожнині гідроциліндра визначається тиском p_1 налаштування спрацьовування віброзбуджувача і тиском p_2 його закриття. Зі збільшенням тиску до p_0 , при якому долаються сили стаціонарного опору, починає переміщуватися робочий стіл. Його переміщення відбувається у результаті імпульсної зміни тиску в порожнині гідроциліндра – падіння тиску від p_1 до p_2 в результаті спрацьовування запірного елемента віброзбуджувача. Для малих робочих ходів столу можливе падіння тиску до $p = p_{cl}$, оскільки в цьому випадку за час t_p надлишок рідини, що визначає перепад $p_2 - p_{cl}$, встигає перетекти в зливний бак до закриття запірного елемента.

При спільному переміщенні вгору столу з заготовкою та рухомою поперечини відбувається навантаження заготовки імпульсами сили. Після досягнення столом крайнього верхнього положення рухома поперечина продовжує незалежне переміщення. Даний відрізок часу характеризується розвантаженим станом заготовки за винятком моменту повернення столу у вихідне положення, який супроводжується ударним імпульсом сили. Аналогічним ударним імпульсом супроводжується повернення у вихідне положення рухомої поперечини.

Практичний інтерес дає можливість створення на базі таких ІВПМ високочастотних вібраційних установок. Аналіз робочих режимів ІВПМ [75] із різними схемами підключення віброзбуджувача показав, що в процесі ВУП дані режими однозначно визначаються характером зміни зусилля навантаження заготовки і можуть бути показані за аналогією з режимами інерційного навантаження. Робочий режим ІВПМ, що забезпечує умови силового впливу на заготовку, близький до віброударного інерційного навантаження, є найрозповсюдженішим. Він

дозволяє впливати на заготовку двома послідовно створюваними короткочасними імпульсами сил (в результаті її взаємодії з верхньою поперечною) протягом одного періоду зміни зовнішньої примусової сили, причому в проміжках часу між дією даних імпульсів заготовка може знаходитись у розвантаженому стані. Для позначення описаного основного робочого режиму ІВПМ у процесі ВУП [68] була введена аббревіатура ВУП-І.

Режим ІВПМ, що забезпечує навантаження заготовки на зустрічному ході столу й рухомої поперечини ударним імпульсом сили з подальшою витримкою її в розвантаженому стані, відповідний умовам ударного режиму інерційного навантаження [75]. За аналогічною з попереднім режимом класифікацією даний робочий режим отримав позначення ВУП-ІІ. Для нього характерним є навантаження заготовки через рівні проміжки часу, кратні періоду виникнення в порожнині гідроциліндра примусових імпульсів тиску рідини.

Робочий режим ІВПМ, що забезпечує одноразове навантаження заготовки короткочасним імпульсом сили при безвідривному від заготовки переміщенні рухомої поперечини, подібний вібраційному режиму інерційного навантаження. В цьому режимі, який отримав позначення ВУП-ІІІ, навантаження заготовки відбувається в момент виникнення в порожнині гідроциліндра примусового імпульсу тиску рідини і супроводжується повним або частковим розвантаженням, але витримка заготовки в розвантаженому стані відсутня.

Введення розглянутої класифікації основних робочих режимів ІВПМ обумовлено різною ефективністю формоутворення ідентичних заготовок при їхньому використанні (відмінами щільності, нерівнощільності і т. д.), відміченою при попередніх експериментальних дослідженнях способів ВУП на ІВПМ для постійних параметрів ГПП і змінних параметрів інерційного навантаження. Наявність класифікації значно спрощує розв'язання задач оптимізації процесів ВУП, особливо на першому етапі їх розробки, оскільки дозволяє обмежити ділянку пошуку оптимальних розв'язків.

2.4 Технологічний комплекс для віброударного пресування

Під технологічним комплексом розуміємо складну систему, яка характеризується структурними та функціональними зв'язками між складовими простіших систем та всередині них.

Система складається з елементів (складових частин, що розрізняються властивостями, які виявляються при взаємодії), з'єднаних зв'язками (лініями передачі одиниць або потоків чого-небудь), які вступають у певні відносини (умови і способи реалізації властивостей елементів) між собою та із зовнішнім середовищем, щоб здійснити процес (послідовність дій для зміни або підтримки стану) і виконати функцію системи (призначення, роль) [131].

В 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 (рис. 2.3) [75].

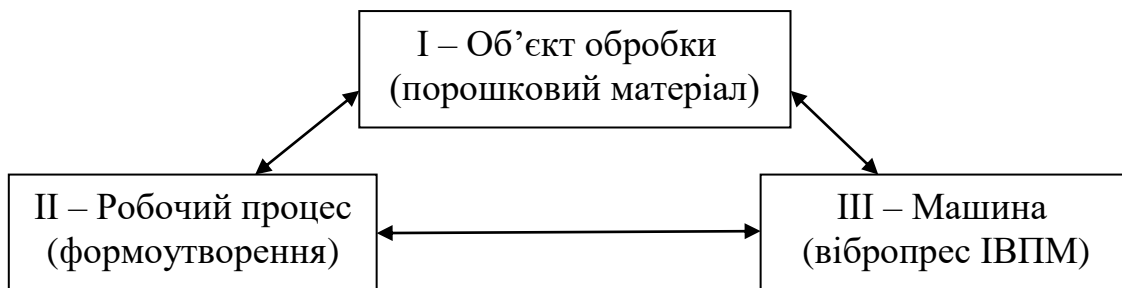


Рис. 2.3. Схема технологічного комплексу віброударного пресування

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, у зв'язку з чим 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 (рис. 2.4).

Об'єкт обробки (порошковий матеріал) входить до нашого технологічного комплексу, якого ми позначили системою I.

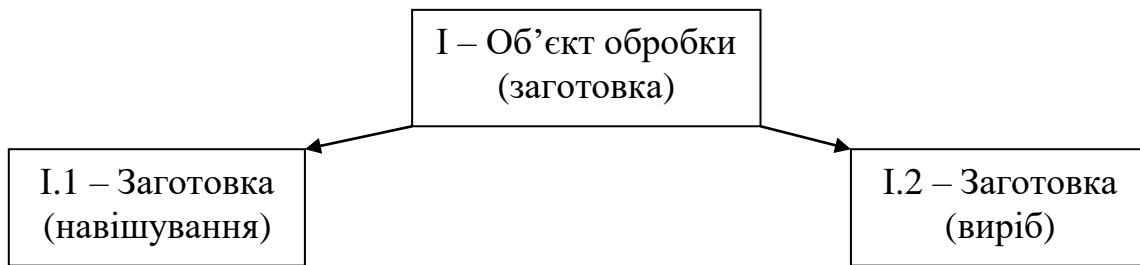


Рис. 2.4. Структурна схема системи I – заготовка

Система I із сукупності перерахованих параметрів заготовки в розділі 2.1 показує, що ряд з них (з індексом «*i*») в процесі ВУП змінюється від значень, що характеризують початковий стан заготовки ($i=0$) в підсистемі I.1, до значень, що характеризують її кінцевий стан ($i=k$) в підсистемі I.2.

З метою скорочення загального числа параметрів за умови збереження потрібної інформації про стан заготовки (система I), а також усунення другорядних параметрів були виконані такі додаткові заходи:

- введено параметр $\vec{R}_{0i} = S_{0i} / \Pi_i$, що характеризує геометричну форму заготовки за аналогією з параметром «гідрравлічний радіус» [24], і визначено його як «геометричний фактор» (R_i , м) для заготовок простої конфігурації $\vec{R}_{0i} = h_{zi}$ – введено поняття відносної щільності $\vec{\rho} = \rho_{3K} / \rho_{30}$, що дозволяє охарактеризувати кінцевий стан заготовки у порівнянні із початковим і розглядати «геометричний фактор» R_0 тільки для початкового стану;

- виключимо із сукупності параметрів системи I параметр K_{zi} , який разом із параметрами \vec{R}_i (або h_{zi}) та ρ_{zi} визначає фактор часу (τ_0 , с) – тривалість зовнішнього імпульсного силового впливу на заготовку, що є основним параметром робочого процесу (система II), оскільки при об'єднанні параметрів систем ІВПМ один з них буде другорядним.

В результаті реалізацій наведених вище заходів число основних параметрів системи I скоротилося до ряду: $\vec{\rho}, m_{zag}, a, R_0, S_{zag}$. Для виділених основних параметрів системи I таким комплексним параметром може бути добуток – $R_0 \cdot S_{zag}$ (або $h_{z0} \cdot S_{zag}$), що характеризує початковий об'єм заготовки. З урахуванням параметра $R_0 \cdot S_{zag}$ для заданої величини ρ_{30} не важко визначити m_{zag} . У зв'язку з вищевикладеним,

скорочену сукупність параметрів системи I запишемо у вигляді $p_I\{\vec{\rho}, m_{заг}, a, R_0, S_{заг}\}$.

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 (рис. 2.5).

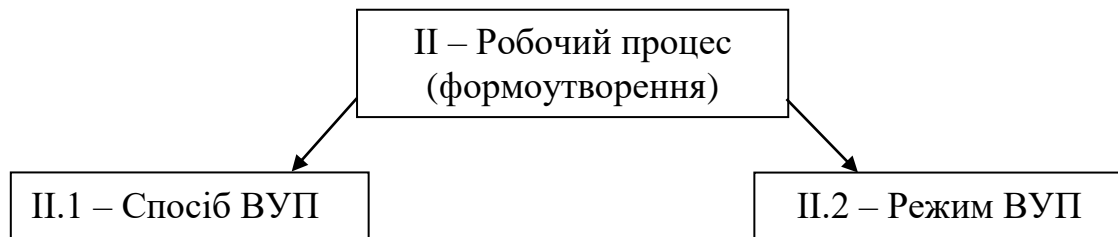


Рис. 2.5. Структурна схема системи II – робочий процес (формування)

Виділимо основні параметри системи II. До даних параметрів системи II, відносяться: тривалість ударного імпульсу (τ_0, c), зусилля додаткового статичного навантаження заготовки ($P_{ст}, H$), максимальне зусилля навантаження заготовки ($F_{з.макс}, H$) в процесі ВУП заготовки, загальне число ходів робочого столу ІВПМ (n) і частота ($f_p, Гц$) їх здійснення. Причому параметри n та f_p можна об'єднати і описати одним параметром, що характеризує повний час робочого процесу ($t_{вуп} = n \cdot f_p^{-1}, c$). Сукупність основних параметрів системи II можна подати у вигляді $\{F_{з.макс}, P_{ст}, f_p, t_{вуп}\}$ [75].

Вибір системи III визначають системи I та II. Системою III є ІВПМ, який ділиться на підсистеми гідроімпульсного приводу (III.1), рухомих ланок (III.2), віброзбуджувача (III.3) і прес-форми (III.4). Згідно з системним підходом кожна з виділених підсистем може бути поділена на ланки. Оскільки при розробці ІВПМ задачі проектування ГП та його віброзбуджувача 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. При цьому кожна з вказаних ланок за необхідності розділяється на деталі (рис. 2.6) [75].

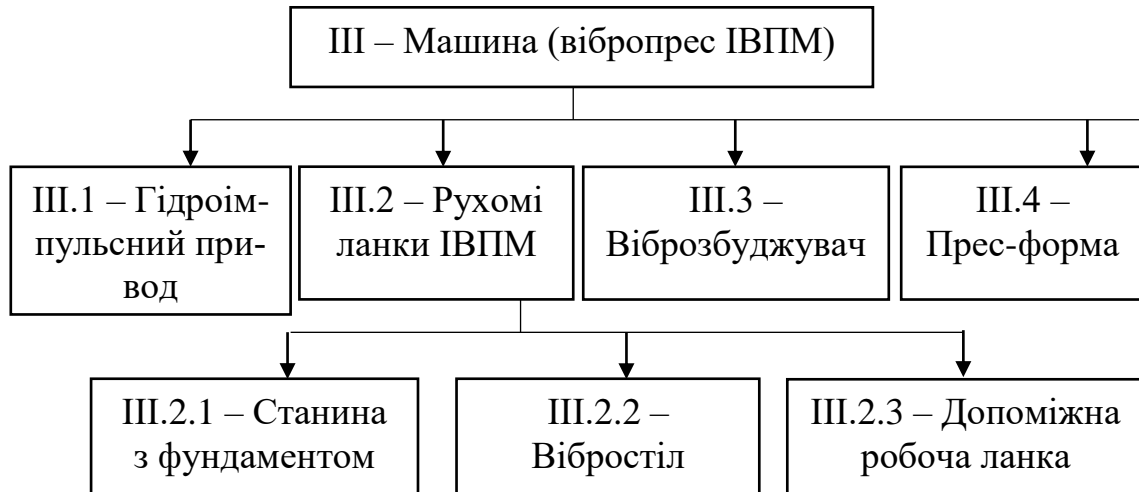


Рис. 2.6. Структурна схема системи III – машина (вібропрес ІВПМ)

Для завершення поданого у вигляді блок-схеми системного опису ІВПМ необхідно виявити в ньому структурні та функціональні зв'язки. На основі перших можна визначити належність та ієрархічну підпорядкованість складових елементів машини, а на основі других – установити логічну послідовність взаємодій в його системах, з виділенням джерел вхідної та вихідної інформації. При аналізі ІВПМ джерелом вхідної інформації служать відомості про оброблюваний об'єкт, які містяться в підсистемі I.1 та передаються в систему II у вигляді логічної функції вибору режиму ВУП. Режим, у свою чергу, визначає робочий процес, з урахуванням параметрів якого проводиться вибір машини конкретного типу (система III).

Логічні функції вибору розробляються на основі результатів теоретичних досліджень, методів розрахунку параметрів режимів інерційного навантаження під час ВУП, нових конструкцій ІВПМ, їхніх структурних схем та динамічних моделей, досліджень перехідних процесів взаємодії рухомих ланок ІВПМ, експериментальних даних, особливостей зміни фізико-механічних властивостей заготовок з порошкових матеріалів при дискретному навантаженні, аналізу основних робочих режимів ІВПМ, досліджень якісних параметрів заготовок. Логічні функції можуть бути подані у формі аналітичних залежностей, таблиць і банків інформації з ключем для їх розшифрування. Функціональний зв'язок між машиною та об'єктом у вигляді функції силового впливу визначається для заданого проміжку часу, що дозволяє отримати вихідну інформацію, яка так само, як і вхідна

пов'язана з об'єктом обробки, але міститься в підсистемі I.2, що відповідає заготовці виробу (рис. 2.3). Функціональний зв'язок між підсистемою III.3 та ланкою III.2.2 має вигляд функції генерування тиску в порожнині робочого циліндра, що періодично змінюється в часі.

На основі аналізу системи III виділяємо параметри, які характеризується параметрами ГПП, наведеному в розділі 2.2 – E_a , W_a , K_{np} , $Q_{н1}$ віброзбуджувача та системи рухомих ланок m_1 , m_2 , m_3 , c_y , c_6 . Параметри прес-форми аналогічні геометричним параметрам заготовки і враховуються в системі I (об'єкт обробки). Відомі аналітичні залежності [60], що устанавлюють зв'язок між вказаними параметрами системи III, дозволяють однозначно обрати серед них основні. Використовуючи даний підхід, розглянемо комплекс параметрів $\{E_a, W_a, p_1, K_{np}\}$.

В даному комплексі будь-які три параметри однозначно визначають четвертий, який можна виділити в число основних параметрів системи III. До основних параметрів системи III необхідно віднести маси m_1 , m_2 та жорсткість пружин повернення c_y . При цьому вважаємо, що маса станини m_3 та жорсткість віброізоляторів c_6 достатньо великі і не впливають на хід робочого процесу [75].

Використовуючи відношення $m_2/m_1 = \alpha$ ($m_2 = \alpha m_1$), параметри конструкції ІВПМ при незмінній масі робочого столу доцільно записати як m_1 , αm_1 , c_y . Для системи III скорочена сукупність основних параметрів можна записати $\{E_a, m_1, \alpha m_1, c_y\}$.

Конструктивне виконання моделі ІВПМ та опис її параметрів дає можливість вибору різних режимів інерційного навантаження під час відпрацювання технологічних процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів способом ВУП, що дозволяє оцінити ефективність їхнього застосування.

Використовуючи системний підхід при подальшому аналізі проєктованого вібропресового обладнання, можна виділити і внутрісистемні функціональні зв'язки.

Функціональні зв'язки складових систем I та II вібропресового обладнання в аналітичній формі, розглянуті, головним чином, на рівні внутрішніх системних зв'язків між параметрами заготовки та ІВПМ. Сукупність міжсистемних функціональних зв'язків досліджуваного обладнання в аналітичній формі з врахуванням параметрів всіх складових систем являє собою математичну модель робочого процесу ВУП, на основі якої можливий розв'язок задач його оптимізації [75].

2.5 Теоретичні основи оцінки ефективності та надійності роботи складових технологічного комплексу для віброударного пресування

Розглянемо основні показники надійності та ефективності для отримання чисельних оцінок. Як відомо із загальної теорії, ймовірність безвідмовної роботи є такою

$$P(t) = 1 - Q(t), \quad (2.7)$$

де $Q(t)$ – ймовірність того, що в межах заданої продовженості роботи відмова виникне.

За означенням маємо:

$$P(t) = R(T \geq t); \quad Q(t) = R(T \leq t), \quad (2.8)$$

де $R(\dots)$ – символ будь-якої події, T – час роботи системи до відмови, t – час роботи системи, для якої визначається ефективність і надійність.

За означенням з теорії ймовірностей функцією розподілення $F(x)$ випадкової величини ξ назвемо ймовірність того, що величина ξ прийме значення менше, ніж деяка величина x , тобто:

$$F(x) = R(\xi < x). \quad (2.9)$$

При статистичному оцінюванні емпірична ймовірність відсутності відмови визначається як відношення:

$$P_E(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} = 1 - \frac{n(t)}{N_0} = 1 - Q_E(t), \quad (2.10)$$

де N_0 – кількість вузлів технологічної системи, що випробовуються, $n(t)$ – кількість вузлів, що відмовили за час t .

Порівнюючи вирази (2.7) та (2.10) бачимо, що вони схожі за своєю структурою, а за зовнішнім виглядом – співпадають. Зі збільшенням кількості вузлів N_0 , що випробовуються, емпіричні оцінки $Q_E(t)$ будуть асимптотично наближатись до $Q(t)$.

Початкові умови функцій $P(t)$ та $Q(t)$ – з однієї сторони, $P_E(t)$ та $Q_E(t)$ – з іншої, задовольняють вимоги:

$$P(0) = 1, \quad Q(0) = 0; \quad P_E(0) = 1, \quad Q_E(0) = 0. \quad (2.11)$$

Як будь-яка безперервна функція, ймовірність відмови $Q(t)$ може бути диференційовна при усіх значеннях аргумента. Із теорії ймовірностей похідна функції розподілу носить назву щільності розподілу:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}, \quad (2.12)$$

де $f(x)$ – щільність розподілу ймовірностей випадкової величини ξ .

Для аналізу надійності щільності розподілу часу роботи ІВПМ до відмови назвемо частотою відмов $a(t)$, яка буде мати вигляд:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{-dP(t)}{dt} = dt. \quad (2.13)$$

Тоді, вирази для оцінювання відмови $Q(t)$ та безвідмовної роботи машини приймуть вигляд:

$$Q(t) = \int_0^t a(t)dt; P(t) = 1 - \int_0^t a(t)dt. \quad (2.14)$$

За статистичним означенням частота відмов є відношенням числа вузлів, що відмовили в одиницю часу, до числа усіх вузлів, що випробовуються, за умови, що вони не відновлюються та замінюються справними:

$$a_E(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (2.15)$$

де $n(\Delta t)$ – кількість вузлів, що відмовили в інтервалі часу Δt .

На рисунку 2.7 наведена типова крива залежності частоти a від часу t .

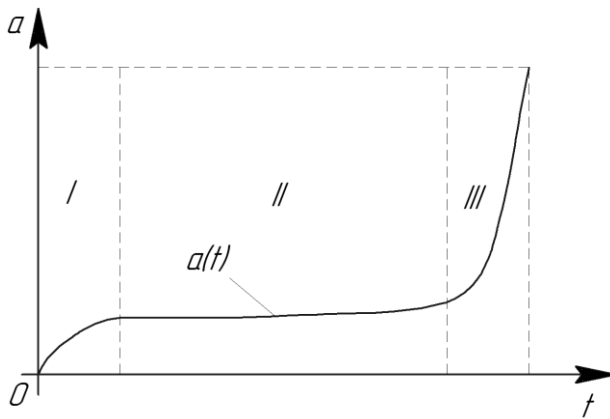


Рис. 2.7. Діаграма залежності частоти відмови a від часу t

Проміжок припрацювання I (рис. 2.7) обумовлений великою кількістю відмов на початку вузла з причини грубих дефектів елементів ІВПМ, помилок обслуговуючого персоналу та ін. Період припрацювання будемо зменшувати за рахунок використання методів тренування та лабораторних випробувань

[59, 62].

Проміжок випадкових відмов II характеризує нормальну роботу ІВПМ. Відмови на цьому проміжку мають, в основному, несподіваний характер.

Проміжок III визивається зносом ІВПМ, коли внаслідок старіння елементів поступово зростає частота відмов.

Важливим є визначення інтенсивності відмов λ , яка є умовною щільністю розподілу часу відмови, що є миттєвою частотою відмов вузла у момент часу t за умови відсутності відмов до цього моменту.

Спочатку визначимо емпіричну статистичну інтенсивність у вигляді:

$$\lambda_E(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{сер} \cdot \Delta t}, \quad (2.16)$$

де $N_{сер} = \frac{(N_i + N_{i+1})}{2} = N_0 - n(\Delta t)$ – середня кількість справних вузлів в інтервалі часу Δt ; N_i, N_{i+1} – кількість вузлів на початку та в кінці проміжку часу Δt .

Ймовірнісне подання інтенсивності $\lambda(t)$ отримаємо, використовуючи основні визначення теорії ймовірностей, замінивши $n(\Delta t)$ його значеннями у вигляді:

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)} = \frac{-dP(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P(t)}. \quad (2.17)$$

У відповідності з вище викладеним уточнимо значення $P(t), Q(t), a(t)$ з врахуванням умов (2.13), (2.14):

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right); \\ Q(t) = (1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right)); \\ a(t) = \lambda(t) \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right). \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Визначимо середній час відсутності відмови T , або математичного сподівання часу роботи вузла до відмови:

$$T = \int_{-\infty}^{+\infty} t a(t) dt. \quad (2.19)$$

Підставляючи у вираз (2.19) значення $a(t)$, проінтегрувавши частини та врахувавши, що $P(0)=1, P(\infty)=0$, і те, що час не може бути від'ємним, отримаємо:

$$T = - \int_{-\infty}^{+\infty} t P'(t) dt = -tP(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (2.20)$$

З урахуванням (2.18) отримаємо:

$$T = \int_0^{\infty} \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) dt. \quad (2.21)$$

Визначимо середній час відсутності відмови зі статистичних даних:

$$T_E = \frac{\sum_{N_0}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (2.22)$$

де t_i – час роботи i -го пристрою до виникнення відмови.

Ця кількісна характеристика достатньо важлива так як дозволяє наглядно судити про ефективність та надійність вузла.

На заключному етапі визначимо дисперсію та середню квадратичну величину часу виникнення відмови $D(t)$ та $\sigma(t)$:

$$D(t) = \int_0^{\infty} (t-T)^2 a(t) dt, \quad (2.23)$$

$$\sigma(t) = \sqrt{D(t)}. \quad (2.24)$$

Для визначення теоретичних положень (2.7) – (2.24) існує можливість використати практичні напрацювання накопичених статистичних джерел [51].

2.6 Оцінка ефективності функціонування технологічного комплексу для віброударного пресування

Наш технологічний комплекс – складна система, яка складається із трьох підсистем (рис. 2.3). Система I – об'єкт обробки, система II – робочий процес, система III – машина. Для кожної з систем можна побудувати математичну модель та оцінити ефективність її функціонування.

Наявність певної функціональної надмірності в структурі більшості складних систем приводить до того, що поява відмов окремих елементів або значні зміни тих чи інших робочих параметрів можуть привести не до повного виходу системи з ладу, а лише до деякого погіршення якості функціонування і зниження ефективності системи в цілому. Для оцінки якості функціонування всього технологічного

комплексу доцільно ввести кількісний показник ефективності функціонування, що враховує вплив таких часткових відмов.

Вибір відповідного показника ефективності функціонування у кожному конкретному випадку визначається типом системи, її призначенням, видом виконуваного завдання, характером різних зовнішніх умов й іншими чинниками.

Оцінка ефективності функціонування системи можна проводити для двох типів систем:

- 1) системи тривалої дії;
- 2) системи короткочасної дії.

Система тривалої дії виконує деяке задану для неї функцію протягом інтервалу часу тривалістю t_0 , починаючи з деякого t . Ефективність функціонування такої системи залежить від конкретної реалізації процесу зміни станів системи протягом цього періоду.

Система короткочасної дії виконує завдання, тривалість вирішення яких t_0 така, що за цей час система напевно залишається в одному і тому ж стані. Практично можна вважати, що величина t_0 дорівнює нулю. Системи короткочасної дії є окремим випадком систем тривалої дії [99].

У деякий довільний момент часу кожен з елементів системи може знаходитися в певному стані, наприклад, в стані працездатності або в стані відмови. Сукупність станів елементів системи однозначно визначає стан системи в цілому.

Кожен стан системи короткочасної дії може бути охарактеризований цілком певним умовним показником ефективності функціонування. Цей показник кількісно характеризує якість виконання системою своїх функцій за умови, що вона при цьому знаходиться саме в даному стані.

З часом система зазнає зміни своїх станів через зміни станів елементів (відмови елементів, їх відновлення та ін.), що входять до її складу. Кожна реалізація процесу переходів системи тривалої дії зі стану в стан може бути охарактеризована цілком певним умовним показником ефективності функціонування. Цей показник кількісно характеризує якість виконання системою своїх функцій за умови, що система при цьому під час вирішення задачі мала саме дану реалізацію процесу переходів з одного стану в інший.

Розглянемо загальну схему оцінювання ефективності функціонування систем короткочасної дії.

Якщо позначити через $h_s(t)$ ймовірність того, що система короткочасної дії у момент часу t знаходиться в s -му стані фаз, то показник ефективності функціонування системи короткочасної дії може бути визначений формулою:

$$E(t) = \sum_S h_s(t) \Phi_s \quad (2.25)$$

де Φ_s — умовний показник ефективності функціонування системи в s -му стані. Підсумовування проводиться по всіх станах системи.

Для системи, що складається з n взаємно незалежних елементів, кожен з яких може знаходитися лише в двох станах (працездатності і відмови), ймовірність $h_s(t)$ легко виражається через показники надійності елементів системи:

– ймовірність того, що всі елементи системи працездатні:

$$h_0(t) = r_1(t)r_2(t)\dots r_n(t) = \prod_{i=1}^n r_i(t); \quad (2.26)$$

– ймовірність того, що в стані відмови знаходиться тільки i -й елемент системи:

$$h_i(t) = r_1(t)\dots r_{i-1}(t) q_i(t) r_{i+1}(t)\dots r_n(t) = \frac{q_i(t)}{r_i(t)} \prod_{k=1}^n r_k(t); \quad (2.27)$$

– ймовірність того, що в стані відмови знаходиться тільки i -й або j -й елементи системи:

$$h_{ij}(t) = \frac{q_i(t)}{r_i(t)} \frac{q_j(t)}{r_j(t)} \prod_{k=1}^n r_k(t). \quad (2.28)$$

Тут через $r_i(t)$ позначена ймовірність стану працездатності i -го елемента системи у момент часу t , а $q_i(t) = 1 - r_i(t)$.

У випадку, якщо має місце умова:

$$\max q_i(t) \ll 1/n, \quad (2.29)$$

оцінювання ефективності функціонування системи може бути проведене за наближеною формулою:

$$\tilde{E}(t) \approx \Phi_0 \left[1 - \sum_{i=1}^n q_i(t)(1 - \Phi_i^*) \right], \quad (2.30)$$

де $\Phi_i^* = \Phi_i / \Phi_0$.

Формула (2.30) дає занижену оцінку в порівнянні з дійсним значенням.

Похибка наближеної оцінки ефективності за формулою (2.12) має порядок (груба оцінка):

$$\delta \approx \frac{n(n-1)}{2} [\max q_i(t)]^2 \Phi_0. \quad (2.31)$$

Оцінимо ефективність системи тривалої дії.

Якщо позначити через $dh_\pi(t, t+t_0)$ елемент ймовірності того, що система тривалої дії в інтервалі $[t, t+t_0]$ мала π -у реалізацію процесу переходу з одного стану в інший і через Φ_π – умовний показник ефективності функціонування системи для цієї реалізації процесу, то показник ефективності функціонування системи тривалої дії може бути визначений за формулою:

$$E(t, t+t_0) = \int_{G\pi} \Phi_\pi dh_\pi(t, t+t_0), \quad (2.32)$$

де інтегрування проводиться за простором всіх можливих реалізацій процесу переходу системи з одного стану в інший в інтервалі часу $[t, t+t_0]$.

Для системи, що складається з n незалежних невідновних елементів, кожен з яких може знаходитися лише в двох станах (працездатності і відмови), формула (2.32) може бути записана у вигляді:

$$E(t, t+t_0) = \Phi_0 \cdot h_0 + \sum_{i=1}^n h_i^* \cdot \int_t^{t+t_0} \Phi_i(x_i) f_i(x_i) dx_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} h_{ij}^* \cdot \int_t^{t+t_0} f_i(x_i) dx_i \int_t^{t+t_0} \Phi_{ij}(x_i, x_j) f_j(x_j) dx_j + \\ + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} h_{ijk}^* \cdot \int_t^{t+\tau} f_i(x_i) dx_i \cdot \int_t^{t+t_0} f_j(x_j) dx_j \cdot \int_t^{t+t_0} \Phi_{ijk}(x_i, x_j, x_k) f_k(x_k) dx_k + \dots$$

де $f_i(x_i)$ – щільність ймовірності відмови i -го елемента у момент часу x_i ;

$h_0 = \prod_{i=1}^n r_i(t, t+t_0)$ – ймовірність того, що жоден з елементів системи не відмовить протягом інтервалу $[t, t+t_0]$;

$h_i^* = \prod_{k=1}^n r_k(t, t+t_0) = \frac{1}{r_i(t, t+t_0)} h_0$ – ймовірність того, що всі елементи, не включаючи i -го, не відмовлять протягом інтервалу $[t, t+t_0]$;

$h_{ij}^* = \frac{1}{r_i(t, t+t_0) \cdot r_j(t, t+t_0)} h_0$ – ймовірність

того, що елементи, не включаючи i -го і j -го, не відмовлять протягом інтервалу $[t, t+t_0]$; Φ_0 – умовний показник ефективності функціонування системи за умови, що жоден з елементів не відмовив в інтервалі $[t, t+t_0]$; $\Phi_i(x_i)$ – умовний показник ефективності функціонування системи за умови, що відмовив тільки i -й елемент, причому відмова його відбулася у момент часу x_i ($t < x_i < t+t_0$); $\Phi_{ij}(x_i, x_j)$ – умовний показник ефективності функціонування системи за умови, що відмовили тільки i -й і j -й елементи, причому відмови їх відбулися в моменти часу x_i і x_j відповідно ($t < x_i < t+t_0, t < x_j < t+t_0$).

У випадку, якщо виконується умова:

$$\max_{1 \leq i \leq n} q_i(t) = \max_{1 \leq i \leq n} \int_t^{t+t_0} f_i(x_i) dx_i \ll 1/n, \quad (2.33)$$

тоді можлива наближена оцінка:

$$\tilde{E} = \Phi_0 \left\{ 1 - \sum_{i=1}^n \left[q_i(t, t+t_0) - \int_t^{t+t_0} \Phi_i^*(x_i) f_i(x_i) dx_i \right] \right\}, \quad (2.34)$$

де $\Phi_i^*(x_i) = \Phi_i(x_i) / \Phi_0$.

Похибка оцінки не перевищує величини:

$$\delta \approx \frac{n(n-1)}{2} \max_{1 \leq i \leq n} [q_i(t, t+t_0)]^2 \Phi_0. \quad (2.35)$$

Слід зазначити, що ряд систем характеризується дуже простим видом умовного показника ефективності функціонування: кожен елемент такої системи вносить свою певну і незалежну частку до загального вихідного ефекту. Такого типу умовні показники ефективності характерні для систем, що є сукупністю технологічного комплексу [60].

Якщо деякий i -й елемент такої системи вносить до загального вихідного ефекту деяку частку ϕ_i , то можна записати:

$$\Phi_i = \Phi_0 - \phi_i; \Phi_{ij} = \Phi_0 - (\phi_i + \phi_j). \quad (2.36)$$

Для систем короткочасної дії такого типу у момент часу t маємо:

$$E = \sum_{i=1}^n \phi_i r_i(t), \quad (2.37)$$

де $r_i(t)$ – вірогідність стану працездатності i -го елемента у момент часу t .

Для систем тривалої дії, у яких i -й елемент дає «внесок» $\phi_i(t_i)$ в загальний вихідний ефект системи у разі відмови в момент $t \leq t_i \leq t+t_0$ вираз для ефективності можна записати:

$$E(t, t+t_0) = \sum_{i=1}^n \left[r_i(t, t+t_0) \phi_{0i} + \int_t^{t+t_0} \phi_i(x_i) dx_i \right],$$

де ϕ_{0i} – «внесок» i -го елемента в загальний вихідний ефект системи у разі безвідмовної роботи в інтервалі часу $[t, t+t_0]$.

2.7 Оцінка надійності роботи системи ІВПМ

З розділу 2.4 ми можемо зробити висновок, що саме від системи ІІ, якою є ІВПМ залежить і робочий режим, і якість заготовки з порошкового матеріалу. Тому доцільно буде створити модель ефективності роботи саме системи ІВПМ.

Більш уважний аналіз показує, що ефективність роботи складових ІВПМ можна покращити, використавши метод локального випадкового пошуку [51] або алгоритмічну модель випадкового пошуку ідентифікації багатостадійного технологічного процесу [84]. Ефективність можна покращити за рахунок використання напрацювань експертних систем, де розроблені методи системного підходу і метод досліджень різноманітних об'єктів, що функціонують в умовах невизначеності [84]. ІВПМ характеризується значною невизначеністю своєї поведінки. В роботі [75] висвітлено питання забезпечення надійності машин на етапах проектування, виготовлення та їхньої промислової експлуатації. Розглянуто взаємопов'язаний комплекс задач – тертя та знос.

У зв'язку з цим розроблено підходи і алгоритми оцінювання точності чисельних розрахунків надійності та ефективності роботи елементів ІВПМ [30, 31, 56].

У загальному випадку надійнісні ланки систем нашої системи зводяться до послідовних з'єднань (рис. 2.8), оскільки не завжди вдається резервувати такі пристрої, як давачі, функціональні блоки, виконавчі механізми та ін. Розглянемо методику розрахунку інтенсивності відмов λ – характеристик при послідовному з'єднанні системи:

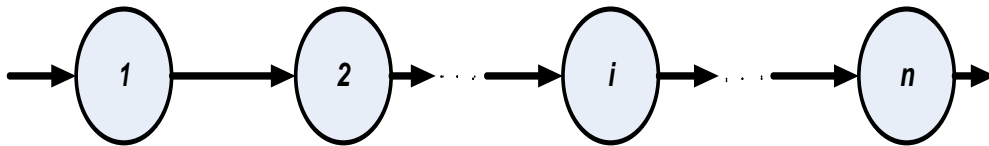


Рис. 2.8. Типова схема надійнісної ланки системи

У випадку відмови i -го елемента (блока) неспотворений сигнал проходить на вихід $(i-1)$ – елемента, а в подальшому або зовсім не проходить по ланцюгу, або спотворюється. Кожний елемент каналу системи у загальному випадку може знаходитись в трьох станах: справному, несправному 1, коли відмова елемента не викликає хибного спрацювання системи (небезпечна відмова), та несправному 2, коли відмова елемента викликає хибне спрацювання системи, якщо всі інші елементи справні.

Якщо в момент часу t відмовив елемент з індексом i , то в інтервалі часу

$[t, t+\Delta t]$ стан каналу системи буде визначатись станом елемента з індексом i та усіх елементів з індексами, більшими за i . Стан елементів з індексами менших ніж i , не впливають на стан каналу системи.

Припустимо, що канал системи знаходиться в даний момент часу у стані $1i$, якщо відмовив елемент з індексом i (причому i – максимальне серед усіх, що відмовили) і елемент з індексом i має відмову виду 1. Аналогічно визначимо стан $2i$ каналу системи. Припустимо також, що кожний з функціональних блоків (послідовних елементів на рисунку 2.8) системи має експоненціальний закон розподілу розподілення часу безвідмовної роботи.

Канал системи має такі властивості:

- 1) переходи каналу системи зі стану $1i$ в стан $2i$ не виникає без зовнішнього впливу;
- 2) зі стану $1i$ можливий перехід в стан з більшим індексом;
- 3) стан $2i$ каналу є поглинальним (кінцевим), тобто потрапляння в нього будь-якого з елементів визиває хибне спрацювання системи;
- 4) відмови каналу системи публічно не контролюються та не відновлюються впродовж робочого періоду пресування.

У прийнятих припущеннях процес переходів зі стану в стан для системи будемо розраховувати методами теорії масового обслуговування. Усі можливі стани каналу системи та переходи з одного стану в інший зобразимо на рисунку 2.9.

де $P_{00}(t)$ – ймовірність знаходження системи у момент часу t в справному стані (00) за умови, що до цього моменту часу система ні разу не знаходилась в стані $2i$; $P_{2i}(t)$ – ймовірність знаходження системи у момент часу t в несправному стані $2i$; R_{1i} – ймовірність відмови системи виду 1 при відмові елемента з індексом i ; R_{2i} – ймовірність відмови системи виду 2 при відмові елемента з індексом i ($R_{1i}+R_{2i}=1$); R_{1ji} – ймовірність того, що при відмові елемента з індексом i відмова системи буде виду 1 та при цьому серед індексів відмовивших елементів до моменту часу t індекс j є максимальним; R_{2ji} – ймовірність того, що при відмові елемента з індексом i відмова системи буде виду 2 та при цьому серед індексів відмовивших елементів до моменту часу t індекс j максимальним; λ_i – інтенсивність відмов i -го елемента системи, якщо цей елемент відмовив першим; λ_{ji} – інтенсивність відмов i -го елемента за умови, що до моменту часу t уже існують несправні елементи у системі, відмовив також елемент з номером j , більшим номерів інших несправних елементів, але меншим номера i .

Ймовірність перебування системи ІВПМ в момент часу t в справному стані дорівнює $P_{00}(t)$. Ймовірність перебування системи ІВПМ в момент часу t в несправному стані небажаної відмови $1i$ за умови, що до моменту часу t система ІВПМ ні разу не потрапляла в несправний стан хибної відмови, дорівнює:

$$Q_1(t) = \sum_{i=1}^n P_{1i}(t). \quad (2.39)$$

Ймовірність переходу системи ІВПМ за час t у стан хибної відмови $2i$ зі справного стану дорівнює:

$$Q_2(t) = \sum_{i=1}^n P_{2i}(t). \quad (2.40)$$

Виходячи з властивості лінійності Лапласових зображень, отримаємо:

$$Q_1(S) = \sum_{i=1}^n P_{1i}(S), \quad Q_2(S) = \sum_{i=1}^n P_{2i}(S). \quad (2.41)$$

3 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

3.1 Розробка моделі функціонування ІВПМ технологічного комплексу віброударного пресування

В результаті аналізу розробленої конструкції ІВПМ (рис. 2.2) та попереднього аналізу взаємодії їх рухомих ланок з врахуванням особливостей використання основного і додаткового гідроприводів [10] складено узагальнену структурну схему ІВПМ (рис. 3.1), в якій виділяється два незалежних привода від насосів Q_{H1} та Q_{H2} з відповідними постійними подачами.

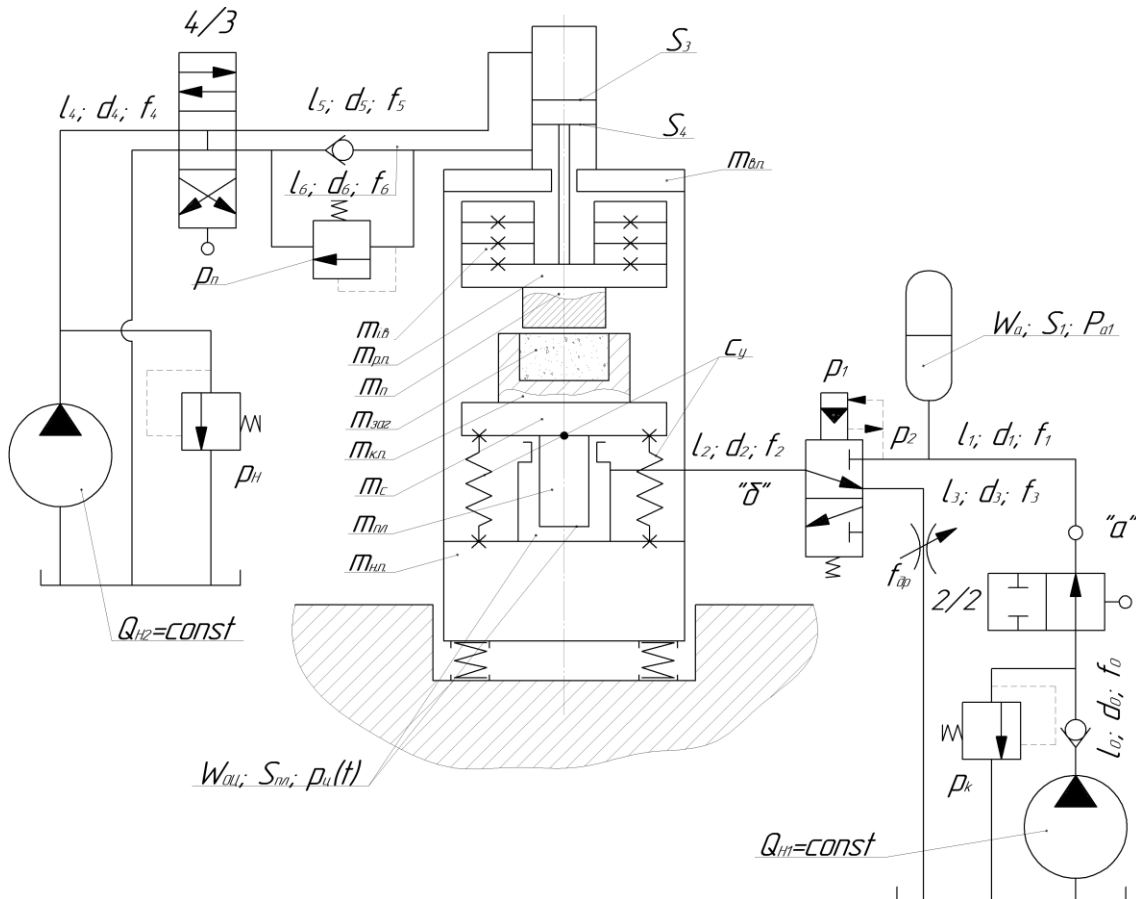


Рис. 3.1. Загальна розрахунково-структурна схема ІВПМ технологічного комплексу віброударного пресування

В допоміжному приводі робоча рідина від насоса Q_{H2} по гідролінії l_4 в залежності від положення золотника розподільника 4/3 надходить по гідролінії l_5 в поршневу або по гідролінії l_6 в штокову порожнини гідродвигуна, а з порожнин, відповідно, штокової та поршневої по гі-

дролініях l_5 чи l_6 – на злив через підпирний клапан, налагоджений на тиск p_n . Такому переміщенню робочої рідини в допоміжному приводі відповідає поступальне переміщення штока гідроциліндра із закріпленою на ньому рухомою поперечиною масою $m_{n,n}$ в напрямку до оброблюваної заготовки масою $m_{заг}$ (вниз) або від неї (вверх).

Після завершення установочних переміщень рухомої поперечини в момент її підведення до заготовки золотник розподільника 4/3 перемикається в середнє положення. Здійснюється попереднє деформування заготовки за рахунок сил ваги рухомої поперечини $m_{n,n}$ із закріпленими на ній змінними масами інерційних вантажів $m_{i,n}$ і пуансонном m_n . При цьому робоча рідина від насоса $Q_{н2}$ по гідролінії l_4 перетікає на злив і функції допоміжного приводу можна вважати виконаними (насос $Q_{н2}$ вимикається), крім випадків створення додаткового статичного притискання заготовки, яке забезпечується при з'єднанні через розподільник 4/3 гідроліній l_4 та l_5 . Після створення додаткового статичного притискання (досягнення в гідросистемі розрахункового тиску спрацювання запобіжного клапана p_N ($p_N > p_n$)) рухома поперечина зупиняється і надлишок робочої рідини з гідроліній l_4 та l_5 , а також з поршневої порожнини гідроциліндра відводиться на злив через запобіжний клапан.

В ГПІ при ввімкненому розподільнику 2/2 напрям подачі робочої рідини від насоса $Q_{н1}$ залежить від схеми підключення вібробуджувача. При підключенні вібробуджувача „на вході” (рис. 3.1) [10], робоча рідина від насоса $Q_{н1}$ по гідролініях l_0 та l_1 подається в порожнину одноциклового гідроаккумулятора з початковим об'ємом W_0 . При постійній подачі насоса $Q_{н1}$ в результаті стисливості робочої рідини і пружного деформування стінок гідроліній та порожнини гідроаккумулятора відбувається накопичення потенціальної енергії, що супроводжується підвищенням тиску в середовищі робочої рідини до величини $p_{a,max}$, яка відповідає тиску p_1 настройки спрацювання вібробуджувача і з'єднання порожнини гідроаккумулятора через гідролінію l_2 з робочою порожниною гідроциліндра основного приводу. Робоча рідина з початковим тиском $p_{a,max}$ з порожнини гідроаккумулятора надходить в робочу порожнину гідроциліндра і передає накопичену потенціальну енергію рухомим ланкам ІВПМ для виконання робочого ходу при взаємодії з плунжером гідроциліндра, площа якого $S_{пл}$. Процес передачі енергії супроводжується змінами тиску в середо-

вищі робочої рідини, що знаходиться в порожнині гідроциліндра згідно із законом $p_u(t)$, що визначається величиною енергії, яка передається, швидкістю її передачі при спрацьовуванні віброзбуджувача, характером деформування стінок гідролінії l_2 робочої порожнини гідроциліндра і пружин пружного повернення, а також зміною сил опору руху плунжера з боку заготовки.

Рух мас плунжера $m_{пл}$, стола m_c , контейнера прес-форми $m_{к.н}$ та заготовки $m_{заг}$ відбувається спільно. Періодичність даного руху залежить від характеру спрацьовування віброзбуджувача, який можна подати функцією $F_B(t+t_u)$.

При падінні тиску в середовищі робочої рідини, що знаходиться в порожнині гідроаккумулятора, до величини $p_{a.max}=p_2$, яка відповідає величині тиску закриття віброзбуджувача, доступ робочої рідини з порожнини гідроаккумулятора у гідролінію l_2 переривається і остання з'єднується через канали віброзбуджувача зі зливною гідролінією l_3 . Робоча рідина з робочої порожнини гідроциліндра по гідролініях l_2 та l_3 перетікає на злив, плунжер $m_{пл}$ з приєднаними конструктивними елементами повертається у вихідне положення під дією сил ваги і стиснених пружин пружного повернення, еквівалентна жорсткість яких c_y . Одночасно робоча рідина подається від насоса $Q_{н1}$ по гідролініях l_0 та l_1 в порожнину гідроаккумулятора W_0 , внаслідок чого збільшується запас накопиченої потенціальної енергії, який визначається величиною тиску p_a . При досягненні в підсистемі тиску $p_a=p_{a.max}=p_1$ спрацьовує віброзбуджувач, з'єднуючи порожнину гідроаккумулятора з гідролінією l_2 і від'єднуючи останню від гідролінії l_3 та зливу. Таким чином робоча рідина періодично надходить до порожнини гідроциліндра і створює в ній тиск, що змінюється за законом $p_u(t+t_u)$.

Конструкція станини ІВПМ на структурній схемі (рис. 3.1) показана у вигляді двох поперечин – нижньої і верхньої, маси яких відповідно позначені $m_{н.н}$ і $m_{в.н}$. Такий підхід дозволяє враховувати жорсткість станини вібропреса c_c при використанні гідроциліндра допоміжного приводу безпосередньо в процесі ВУП для забезпечення статичного притискання пуансона до заготовки з боку рухомої поперечини або для виконання установочних переміщень поперечини на етапі підготовки до реалізації технологічного процесу, наприклад, для встановлення та знімання контейнера прес-форми. Для запобігання

передачі основи з боку станини шкідливих вібрацій остання встановлена на віброізоляторах, характеристика яких у вигляді функції $R_e(x, \dot{x})$, визначає реакцію взаємодії станини з основою.

Аналіз узагальненої структурної схеми показує, що ІВПМ являє собою гідромеханічну систему, що складається з твердих елементів в поєднанні з рідинними елементами. Для дослідження гідромеханічних систем з розподіленими вздовж осей координат параметрами – масою, пружними і дисипативними силами застосовують диференціальні рівняння у частинних похідних [113], загальний розв’язок, яких не завжди прийнятний для прикладних інженерних задач. Також значно ускладнює процес дослідження і нелінійний характер більшості сил, що діють в системі.

Для усунення вищезгаданих складностей при дослідженні гідромеханічної системи ІВПМ використовуємо загальну методику розв’язання прикладних інженерних задач розрахунку та конструювання гідравлічних ковальсько-штампувальних машин [73, 76].

Для гідромеханічної системи ІВПМ виконується умова, що частота періодичної дії вібробуджувача ГПП на гідросистему $\nu = t_c^{-1}$ менша її першої резонансної частоти. За відомими рекомендаціями [73] виконуючи цю умову, яка оцінюється в залежності від довжини гідролінії l критерієм $l < 300/\nu$, можна скласти динамічну багатомасову модель машинної системи з використанням „пружної зосередженої” моделі, в якій рідина має в’язкість і стискається, а канали гідролінії деформуються в поперечному перерізі безінерційно. Основні параметри мас, пружних та деформованих елементів розглядаються приведеними, що дозволяє на основі припущення про незалежність параметрів руху від координати використати звичайні диференціальні рівняння руху [125, 126, 131].

На основі узагальненої структурної схеми ІВПМ (рис. 3.1) з врахуванням вищевикладеного можна скласти загальну багатомасову динамічну модель ІВПМ (рис. 3.2), в якій позначені такі приведені елементи:

$m_{i,p}$ – маса робочої рідини в гідролінії довжиною l_i , діаметром d_i та площею поперечного перерізу f_i (при $i=0, 1, 2, \dots, 6$);

m_a – маса рідини в порожнині гідроаккумулятора;

$m_{g,n}, m_{n,n}$ – маса верхньої і нижньої (з приєднаним блоком фундаменту) поперечин ІВПМ, що складають масу станини $m_I = m_{g,n} + m_{n,n}$;

m_{II} – маса робочої ланки ІВПМ, що враховує маси плунжера, стола, контейнера прес-форми і заготовки $m_{II} = m_{nl} + m_c + m_{к.н} + m_{заг}$;

m_{III} – маса рухомої поперечини, що враховує маси змінних інерційних вантажів і пуансона $m_{III} = m_{n.n} + m_n + m_{u.n}$;

$c_{i.p}$ – жорсткість гідролінії l_i , заповненої робочою рідиною;

$c_{в.з}$, $c_{о.з}$ – жорсткість гідроциліндрів допоміжного та основного приводів з робочою рідиною;

c_c – жорсткість станини;

$b_{i.p}$ – коефіцієнт демпфування гідролінії l_i ;

$b_{в.з}$, $b_{о.з}$ – коефіцієнти демпфування в з'єднаннях поршня і штока допоміжного гідроциліндра і плунжера основного гідроциліндра;

j – передаточне число (j_{01} – від гідролінії l_0 до гідролінії l_1 ; j_{12} – від гідролінії l_1 до гідролінії l_2 ; $j_{2о.з}$ – від гідролінії l_2 до порожнини гідроциліндра основного приводу; $j_{5в.з}$ – від гідролінії l_5 до порожнини гідроциліндра допоміжного приводу; j_{54} – від гідролінії l_5 до гідролінії l_4 ; $j_{6в.з}$ – від гідролінії l_6 до порожнини гідроциліндра допоміжного приводу; $j_{1а}$ – від гідролінії l_1 до порожнини гідроаккумулятора W_a);

$F_{n1}(t, x)$, $F_{n2}(t, x)$ – функції джерел енергії основного та допоміжного приводів;

$F_{p1}(t, x)$, $F_{p2}(t, x)$ – функції гідророзподільників основного 2/2 та допоміжного 4/3 приводів;

$F_в(t+t_y)$ – функції вібробудувачів основного привода встановленого «на вході»;

$F_a(x, \dot{x})$ – функція одноциклового гідроаккумулятора;

$R_{II-I}(\dot{x})$, $R_{III-I}(\dot{x})$ – функції сил зовнішнього опору руху мас m_{II} та m_{III} відносно станини;

$R_з(x, \dot{x}, t)$ – функція технологічного опору (деформування заготовки);

$R_в(x, \dot{x})$ – функція віброізоляторів.

Для аналітичного опису загальної динамічної моделі ІВПМ необхідно скласти систему з вісімнадцяти (за числом ступенів вільності) диференціальних рівнянь руху приведених мас вздовж відповідних осей координат. Дана загальна математична модель ІВПМ може бути розв'язана чисельними методами за допомогою комп'ютера. Істинність отриманої при цьому інформації, наприклад, про характер руху приведених мас машинної системи буде залежати від точності визна-

чення величин коефіцієнтів, що входять до математичної моделі ІВПМ, а також аналітичної форми функцій відповідних змінних.

При розв'язуванні конкретних задач загальну динамічну модель ІВПМ (рис. 3.2) можна спростити з врахуванням особливостей роботи самої машинної системи. Наприклад, при розв'язуванні задач проектування допоміжного приводу ІВПМ загальна динамічна модель значно спрощується (рис. 3.3), оскільки в роботі ІВПМ не бере участі основний привод і, відповідно, підсистему від маси m_{0p} до маси m_{3p} можна при цьому не розглядати. Динаміка допоміжного приводу ІВПМ аналогічна динаміці гідропресів з насосним приводом.

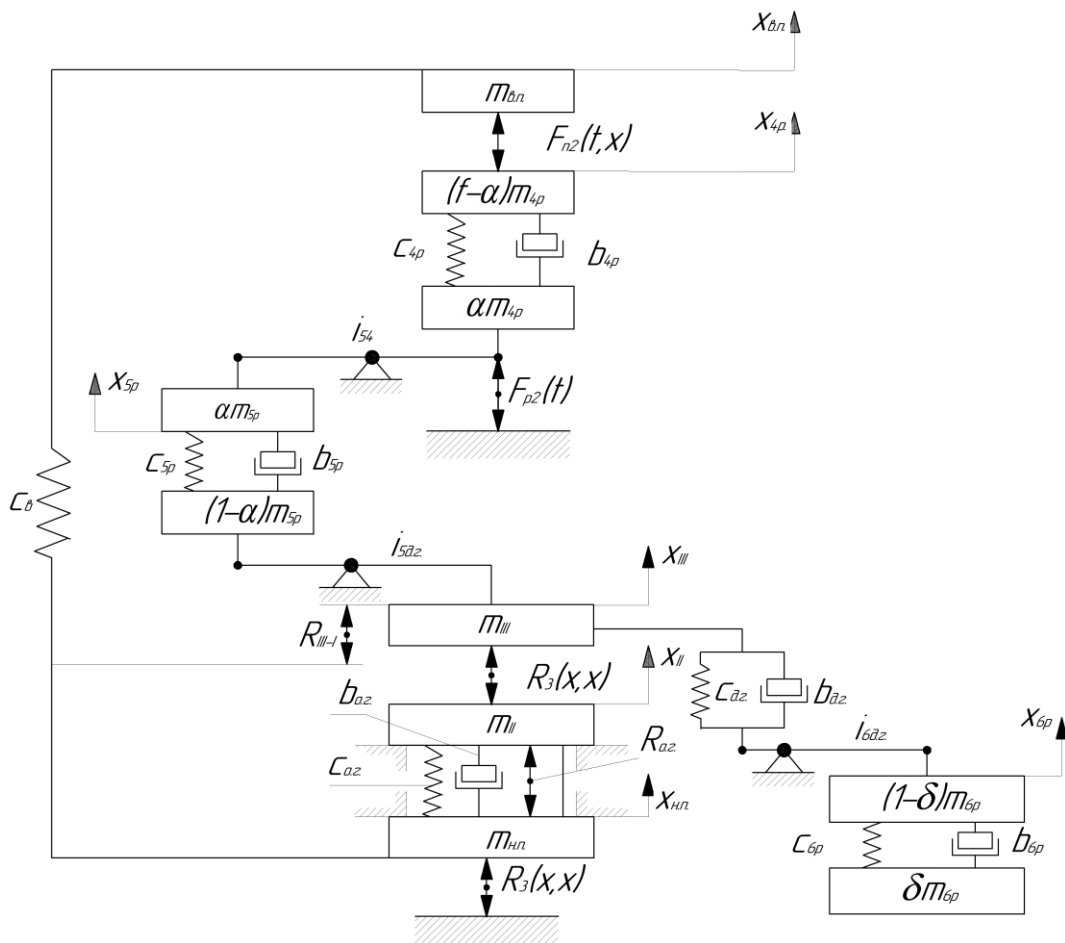


Рис. 3.3. Динамічна модель ІВПМ при відключеному основному приводі

Під час перехідного процесу на етапі робочого ходу ІВПМ з інерційним навантаженням заготовки, що реалізується в результаті взаємодії робочої ланки m_{II} з рухомою поперечною m_{III} при вимкненому допоміжному приводі підсистеми $m_{4p}-m_{6p}$ в загальній динамічній моделі ІВПМ можна не розглядати. Характер динамічної взаємодії верхньої $m_{e.n}$ і нижньої $m_{н.н}$ поперечин станини в цьому випадку ви-

значається функцією сил зовнішнього опору руху рухомої поперечини $R_{III-I}(\dot{x})$. Деформація станини жорсткістю c_c , що виникає під дією вказаних сил, на декілька порядків менша будь-якого з переміщень приведених мас машинної системи. Тому відносне зміщення мас $m_{e,n}$ і $m_{n,n}$ в динамічній моделі ІВПМ для етапу робочого ходу можна не враховувати і обмежитись розглядом переміщення маси станини m_I (рис. 3.4). Припущення про недеформованість станини m_I можна використовувати і для випадків застосування додаткового статичного притискання P_{cm} рухомої траверси m_{III} до рухомої ланки m_{II} ІВПМ. В реальних конструкціях ІВПМ зусилля P_{cm} визначається величиною питомого статичного притискання ($P_{cm}=0,1\dots 1,0$ МПа [40]) і для заготовок з площею поверхні в плані порядку $2 \cdot 10^{-2}$ м² ($\varnothing = 500$ мм) не перевищує $2 \cdot 10^4$ Н. Навіть за мінімальної жорсткості станини, яка рекомендується для одностоякового преса $c_c = 8 \cdot 10^8$ Н/м [123], її деформація, що відповідає зусиллю $2 \cdot 10^4$ Н, не перевищує $2 \cdot 10^{-5}$ м. Участь в роботі ІВПМ допоміжного приводу при використанні додаткового статичного притискання у відповідній динамічній моделі (рис. 3.4) враховується послідовним приведенням мас, видаленням передаточних ланок підсистеми $m_{4p}-m_{6p}$ і об'єднанням мас m_{4p} , m_{5p} та m_{III} в одну масу m_{III}^* .

При складанні динамічної моделі ІВПМ для етапу робочого ходу взаємодія маси m_{III} (або m_{III}^*) з масою m_I визначається функцією зовнішнього опору руху маси m_{III} у вигляді $R_{III-I}(x, \dot{x})$, яка в загальному випадку враховує також зусилля додаткового статичного притискання, сили пружного деформування і в'язкого демпфування в підсистемі додаткового приводу.

Аналіз даної моделі можемо провести чисельними методами, наприклад, шляхом опису її системою одинадцяти диференціальних рівнянь, розв'язання

Для розробки наближених аналітичних методів розв'язання задач з проектування ІВПМ доцільно провести додатковий аналіз його динамічної моделі (рис. 3.4), а саме: підсистеми ГП на основі порівняння відносної величини приведених мас $m_{0p}-m_{3p}$ та m_a , послідовності їх взаємодії, а також в залежності від способу підключення і характеру спрацьовування віброзбудувача ГП, що визначається функцією $F_e(t+t_u)$, або $F_e'(t+t_u)$.

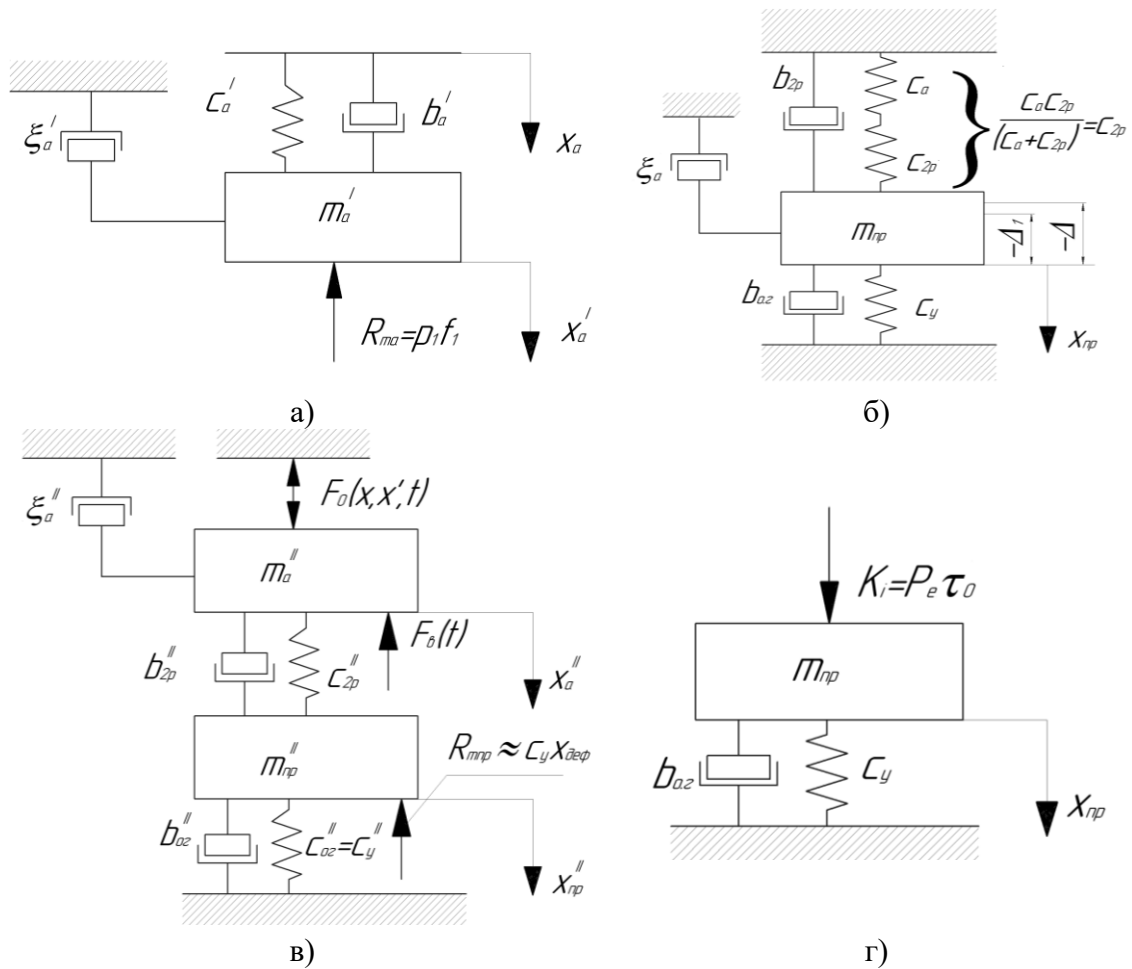


Рис. 3.5. Окремі динамічні моделі основних етапів перехідних процесів в підсистемі гідроімпульсного привода:
 а – етап I зарядки одноциклового гідроаккумулятора; б, в, г – етап II розрядки одноциклового гідроаккумулятора

Приведення параметрів динамічної моделі зарядки гідроаккумулятора (рис. 3.5, а) до перерізу f_1 гідролінії l_1 можна виконати за відомою методикою [10, 35] у вигляді:

$$m_a^I = \frac{1}{3} \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^2 \cdot \rho_p \cdot l_0 \cdot f_0 + \frac{1}{3} \left(\frac{f_1}{f_1} \right)^2 \rho_p \cdot l_1 \cdot f_1 + \frac{1}{3} \left(\frac{f_1}{S_0} \right)^2 \rho_p \cdot W_a;$$

$$c_a^I = \frac{f_1^2 K_{np}}{l_0 f_0 + l_1 f_1 + W_a}; \quad b_a^I = 2 \sqrt{c_a^I \cdot m_a^I} \beta;$$

$$\xi_a^I = f_1^3 \frac{\rho_p}{2} \left(\lambda \frac{(l_0 + l_1)}{d_y \cdot f_1^2} + \frac{\zeta_{ок} + \zeta_{зр}}{f_1^2} \right),$$

де $\zeta_{ок}$ та $\zeta_{зр}$ – коефіцієнти місцевих опорів відповідно на зворотному клапані та гідророзподільнику ($\zeta_{ок}=3$ та $\zeta_{зр}=4$ [1, 101]); β – відносний

коефіцієнт демпфірування ($\beta=0,005$ [10]); λ – коефіцієнт гідравлічного тертя в трубопроводах (для турбулентного режиму течії рідини при відносній шорсткості $\Delta=0,06\dots 0,2$; $\lambda=0,02$ [10]).

Аналіз динамічної моделі ГПП, що відповідає заряджанню гідроаккумулятора від насоса з постійною подачею $Q_{н1}$, значно спрощується при умові, що маса m_a^I в перерізі приведення нерухома $x_a(t)=0$ і достатньо розглянути рух рідини вздовж координати x_0^I в перерізі гідролінії безпосередньо біля насоса. Використовуючи відомі припущення [20, 35], що дозволяють не враховувати складові даного руху в результаті накладання, наприклад, пульсацій подачі насоса та інших подібних впливів, переміщення x_0^I можемо вважати рівномірним:

$$x_0^I = \frac{Q_{н1} \cdot t}{f_0}. \quad (3.1)$$

Тоді закон зміни тиску в гідросистемі з урахуванням деформації пружної ланки c_a^I можна визначити з відомого виразу [10]:

$$p(t) = \frac{Q_{н1} \cdot c_a^I}{f_0 \cdot f_1} \cdot t. \quad (3.2)$$

При досягненні в гідросистемі тиску p_1 за час $t_{н.д}$ спрацьовує вібробуджувач і з'єднує гідролінії l_1 та l_2 , що відповідає початку II етапу спрацьовування ГПП.

II етап. Для аналізу процесу розрядки одноциклового гідроаккумулятора в порожнину основного гідроциліндра при відкритті запірного елемента вібробуджувача можна використовувати двомасову динамічну модель, параметри якої приведені до перерізу f_2 гідролінії l_2 (рис. 3.5, б). Маса m_a^{II} відповідає масі рідини в гідросистемі, а маса m_{np}^{II} – масам рухомих ланок ІВПМ m_I, m_{II}, m_{III} , що приведені до центра мас. Модель розглядається без врахування подачі насоса $Q_{н1}$, виходячи із припущення, що процес розрядки короткочасний і об'єм робочої рідини, що надходить від насоса до гідроциліндра за даний проміжок часу, не впливає на переміщення мас.

Приведення параметрів динамічної моделі процесу розрядки гідроаккумулятора (рис. 3.5, б) до перерізу f_2 гідролінії l_2 при нерухомій масі m_{np}^{II} ($x_{np}^{II} = 0$):

$$m_a^{II} = \frac{1}{3} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \cdot m_a^I + \frac{1}{3} \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \rho_p \cdot l_2 \cdot f_2 + \frac{1}{3} \left(\frac{f_2}{S_{nl}} \right)^2 \rho_p \cdot W_{ou};$$

$$m_{np}^{II} = \frac{1}{3} \left(\frac{f_2}{S_{nl}} \right)^2 \cdot \frac{m_I(m_{II} + m_{III})}{m_I + m_{II} + m_{III}}; \quad c_a^{II} = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \cdot c_a^I;$$

$$c_p^{II} = \frac{f_2^2 K_{np}}{l_2 f_2 + W_{ou}}; \quad b_{2p} = 2 \sqrt{c_{2p}^{II} \cdot m_a^{II}} \cdot \beta;$$

$$\xi_a^{II} = f_2^3 \frac{\rho_p}{2} \left(\lambda \frac{(l_0 + l_1 + l_2)}{d_y \cdot f_2^2} + \frac{\zeta_{ок} + \zeta_{2p} + \zeta_{вв}}{f_2^2} \right),$$

де $\zeta_{вв}$ – коефіцієнт місцевого опору віброзбуджувача "на вході" (за експериментальними даними авторів $\zeta_{вв} = 13$).

Ґрунтуючись на результатах експериментальних досліджень [10], візьмемо справцювання запірнього елемента віброзбуджувача миттєвим (релейним). Таке припущення передбачає для $t=0$ рівність силових функцій віброзбуджувача $F_a(0)$ та одноциклового гідроаккумулятора $F_a(0)$. В результаті маса m_a^{II} починає рух під дією миттєво прикладеної сили $F_a(0)$, величина якої визначається тиском зарядки одноциклового акумулятора p_l . Характер руху маси m_a^{II} для нерухомої маси $m_{np}^{II}(x_{np}^{II}=0)$ можемо розглядати як затухаючий коливальний процес під дією попередньодеформованої пружини жорсткістю c_a^{II} на величину $x_{a0}^{(II)} = F_a / c_a^{II}$. Період даних коливань не залежить від турбулентного демпфірування [10, 20] і перехід маси m_a^{II} через положення рівноваги може відбутись за дуже малий проміжок часу:

$$t_{a0} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{\frac{c_a^{II} + c_{2\text{жс}}^{II}}{m_a^{II}} - \left(\frac{b_{2\text{жс}}}{2m_a^{II}} \right)^2}}, \quad (3.3)$$

що для реальних ГПІ менший 10^{-4} с.

Прийнявши припущення $t_{a0} \rightarrow 0$, для аналізу перехідного процесу розрядки одноциклового гідроаккумулятора можна передбачити миттєве збудження, при якому рух мас m_a^{II} та m_{np}^{II} починається одночасно.

Як показали відомі дослідження [10], коливання маси m_a^{II} мало впливають на переміщення маси m_{np}^{II} . Особливо несуттєвим даний вплив є для реальних ГП ІВПМ, для яких $m_{np}^{II}/m_a^{II} \gg 10$ [68].

Тому переміщення маси m_{np}^{II} можемо розглядати (вважаючи $m_a^{II} \approx 0$), як переміщення, що відбувається під безпосереднім впливом стисненої зусиллям F_a^I пружини (стовпа рідини) жорсткістю $c_{жс}^{II} = (c_a^{II} \cdot c_{2p}^{II}) / (c_a^{II} + c_{2p}^{II})$.

Величина даного зусилля знаходиться з умови:

$$F_a^{II} = \sqrt{2E_a \cdot c_{жс}^{II}}, \quad (3.4)$$

де $E_a = \frac{p_1^2 \cdot W_a^*}{2K_{np}}$ – енергія, накопичена в гідросистемі до віброзбуджу-

вача для тиску p_1 ; $W_a^* = W_a + f_0 l_0 + f_1 l_1$ – акумулювальний об'єм системи; K_{np} – зведений модуль її пружності.

Для $c_{2p}^{II} \gg c_a^{II}$ вираз (3.4) перетворюється до вигляду:

$$F_a' \approx \sqrt{2E_a \cdot c_a^{II}} = F_a. \quad (3.5)$$

Для аналізу динаміки процесу переміщення маси m_{np} при розрядці гідроаккумулятора можна використовувати одномасову модель (рис. 3.5, в), параметри якої зведені до перерізу S_{nl} плунжера основного гідроциліндра.

Зведення параметрів динамічної моделі процесу розрядки гідроаккумулятора (рис. 3.5, в) до перерізу S_{nl} плунжера гідроциліндра основного приводу для $m_a = 0$ має вигляд:

$$m_{np} = \frac{m_I (m_{II} + m_{III})}{m_I + m_{II} + m_{III}}; \quad c_a = \frac{S_{nl}^2 K_{np}}{W_a + f_0 \cdot l_0 + f_1 l_1}; \quad c_{2p} = \frac{S_{nl}^2 \cdot K_{np}}{l_2 f_2 + W_{ou}}; \quad c_p = \frac{c_a \cdot c_{2p}}{c_a + c_{2p}};$$

$$\xi_{np} = \left(\frac{S_{nl}}{f_2} \right)^3 \cdot \xi_a^{II}; \quad b_{2p} = 2\sqrt{c_{2p} \cdot m_{np}} \cdot \beta; \quad b_{o.e} = 2\sqrt{c_y \cdot m_{np}} \cdot \beta; \quad c_y \approx c_{o.e}.$$

Переміщення маси m_{np} описується в загальному випадку рівнянням коливань, що згасають:

$$m_{np} \cdot \ddot{x}_{np} + \xi_{np} \cdot \dot{x}_{np}^2 + (b_{2жс} + b_{o.e}) \dot{x}_{np} + (c_{жс} + c_y) x_{np} = 0, \quad (3.6)$$

початкові умови якого визначаються вихідною деформацією пружних елементів, яка відповідає величині витраченої енергії.

За початок координати x_{np} беремо положення рівноваги маси m_{np} досліджуваної моделі. Максимальне зміщення маси m_{np} відносно по-

ложення рівноваги у вихідному стані ($t=0$) за відсутності втрат енергії на усунення сил стаціонарного опору $R_{m,np}$ визначається деформацією: $\Delta = \sqrt{2E_a / (c_p + c_y)}$.

У ІВПМ стаціонарний опір переміщенню маси m_{np} створюється, головним чином, завдяки попередньому натягу пружин пружного повернення $P_0 = c_y x_{def}$ [10, 20], що дозволяє взяти $R_{m,np} \approx P_0$. Для подолання даного опору до моменту початку руху маси m_{np} витрачається енергія $0,5c_y x_{def}^2$ і зміщення маси m_{np} з вихідного положення визначається деформацією:

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2E_a - c_y x_{def}^2}{c_p + c_y}}. \quad (3.7)$$

Початкові умови рівняння (3.6), в загальному випадку, знаходяться за допомогою виразу (3.7) і можуть бути записані у вигляді $t'=0$ та $x_{np}(t'=0) = -\Delta_1$, оскільки в часі t процесу розрядки необхідно додатково враховувати час τ_{zan} – запізнення початку руху маси $m_{np}(t=t'+\tau_{zan})$, що обумовлено подоланням сил стаціонарного опору.

Повному розряджанню одноциклового гідроаккумулятора коли $t' = \tau_p$ повинна відповідати недеформована пружна ланка c_p . Такий стан визначається переміщенням маси m_{np} з вихідного положення на величину:

$$\Delta_{max} = \sqrt{\frac{2E_a - c_y x_{def}^2}{c_p}}. \quad (3.8)$$

Координата даного положення маси m_{np} $x_{np}(\tau_p) = \Delta_{max} - \Delta_1$.

Проте, під час розряджання гідроаккумулятора масі m_{np} передається лише частина енергії E_a , величина якої $E_p = \left((p_1^2 - p_2^2) W_a^* \right) / 2K_{np}$ залежить від тиску p_2 закриття вібробуджувача [10]. Характер зміни тиску в гідросистемі з урахуванням початкових умов (3.7) описується виразом:

$$p_u(t') = \frac{c_p + c_y}{S_{nl}} x_{np}(t'). \quad (3.9)$$

Використовуючи (3.9), знаходимо координату маси m_{np} , при якій завершується процес розрядки гідроаккумулятора за час $t' = \tau_0$:

$$x_{np}(\tau) = -\frac{p_2 S_{nl}}{c_p + c_y}. \quad (3.10)$$

З моменту часу $t' = \tau_0$ пружна ланка c_p не впливає на переміщення маси m_{np} , яка у подальшому розглядається (для $t' > \tau_0$) як тіло, що рухається з початковою швидкістю $\dot{x}_{np}(\tau_0) = v_{np.0}$.

Нелінійне рівняння руху маси m_{np} (3.6) протягом відрізка часу $0 \leq t' \leq \tau_0$ в результаті підстановки $v(x) = \dot{x}(t')$ може бути зведено до рівняння Абеля другого роду, розв'язок якого відомий [16]. Проте, в ГП в'язке демпфування практично не впливає на процес розрядки одноциклового гідроаккумулятора, що дозволяє в рівнянні (3.6) взяти $m_{np}^{-1}(b_{o.z.} + b_{2p})\dot{x}_{np} \approx 0$ і при дослідженні переміщення маси m_{np} розглядати рівняння:

$$\ddot{x}_{np} + \frac{\xi_{np}}{m_{np}} \dot{x}_{np}^2 + \left(\frac{c_p + c_y}{m_{np}} \right) x_{np} = 0, \quad (3.11)$$

з початковими умовами $t' = 0$, $x_{np}(0) = -\Delta_1$ і граничними умовами $t' = \tau_0$, $x_{np}(\tau_0)$, знайденими за допомогою (3.7) та (3.10).

Якщо в (3.11) замінити $w(x_{np}) = \dot{x}_{np}^2(t')$ отримуємо лінійне рівняння:

$$\ddot{w} + \frac{2\xi_{np}}{m_{np}} w + 2 \left(\frac{c_p + c_y}{m_{np}} \right) = 0. \quad (3.12)$$

Розв'язок рівняння (3.12) відомий [10] і має вигляд:

$$\dot{x}_{np} = \sqrt{C e^{-2 \frac{\xi_{np}}{m_{np}} x_{np}} + \frac{m_{np}(c_p + c_y) \left(1 - 2 \frac{\xi_{np}}{m_{np}} x_{np} \right)}{2 \xi_{np}^2}}, \quad (3.13)$$

де

$$C = \frac{m_{np}(c_p + c_y)}{2 \xi_{np}^2} \left(1 + 2 \frac{\xi_{np}}{m_{np}} \Delta_1 \right) e^{-2 \frac{\xi_{np}}{m_{np}} \Delta_1}. \quad (3.14)$$

З (3.13) слідує:

$$t' = C_1 + \int \frac{dx_{np}}{\sqrt{Ce^{-2\frac{\xi_{np}}{m_{np}}x_{np}} + \frac{m_{np}(c_p + c_y)}{2\xi_{np}^2} \left(1 - 2\frac{\xi_{np}}{m_{np}}x_{np}\right)}}}. \quad (3.15)$$

Підставляючи в (3.15) межі інтегрування $-A_1$ з (3.7) та $x_{np}(\tau_0)$ з (3.10) для $C_1=0$ можна знайти чисельним методом [82, 90] час τ_0 , який відповідає етапу продовження дії зовнішнього силового навантаження на масу m_{np} з моменту початку її руху.

Час запізнення τ_{zan} початку руху маси m_{np} також можна знайти за допомогою (3.15), обравши межі інтегрування від $-A$ до $-A_1$ (3.7) і визначивши постійну C у виразі (3.13) при початкових умовах $t=0$, $x_{np}(0) = -A$.

Загальна тривалість процесу розряджання одноциклового гідроаккумулятора:

$$\tau_p = \tau_{zan} + \tau_0 \leq t_p', \quad (3.16)$$

визначає мінімально допустимий час спрацьовування запірного елемента віброзбуджувача t_p' [10].

Для дослідження руху маси m_{np} після розряджання гідроаккумулятора (при $t \geq \tau_p$) доцільно використати одномасову динамічну модель (рис. 3.5, г). Закон руху маси m_{np} з моменту часу $t'' = 0$ ($t = t'' + \tau_p$) описується лінійним рівнянням:

$$m_{np} \cdot \ddot{x}_{np} + b_{o.z} \dot{x}_{np} + c_y x_{np} = 0, \quad (3.17)$$

з початковими умовами $\dot{x}_{np}(t''=0) = \dot{x}_{np}(t'=\tau_0) = v_{np.o}$, знайденими за допомогою виразу (3.13) способом підстановки в нього значення $x_{np}(\tau_0)$ з (3.10).

Розв'язок рівняння (3.16) відомий [16, 82, 90] і має вигляд:

$$x_{np}(t'') = \frac{V}{\omega^*} e^{-\beta \omega t''} \sin(\omega^* t''), \quad (3.18)$$

де

$$\omega^* = \omega \sqrt{1 - \beta^2}; \quad \omega = c_y / m_{np}; \quad \beta = b_{o.z} / 2\sqrt{m_{np}c_y}. \quad (3.19)$$

Тривалість $\tau_0 = \frac{2h_{30} \cdot h_{3к}}{\left(h_{30} \cdot \sqrt{\frac{H_{30}}{\rho_{30}}} - h_{3к} \cdot \sqrt{\frac{H_{3к}}{\rho_{3к}}} \right)}$ етапу продовження впливу

зовнішньої сили на масу m_{np} для ГП ІВПМ значно менша від періоду її вільних коливань $2\pi/\omega$. Де h_{30} – висота заготовки у початковий момент ВУП; $h_{3к}$ – висота заготовки у кінцевий момент ВУП; H_{30} – модуль умовної пружності заготовки у початковий момент ВУП; $H_{3к}$ – модуль умовної пружності заготовки у кінцевий момент ВУП; ρ_{30} – середня щільність заготовки у початковий момент ВУП; $\rho_{3к}$ – середня щільність заготовки у кінцевий момент ВУП. Звичайно їх співвідношення $(\tau_0 \omega_{np}) / (2\pi) \approx 0,15 \dots 0,16$, що дозволяє розглядати процес фактичного переміщення маси m_{np} з моменту часу $t = \tau_{зан}$ під впливом імпульсу сили K_i , допускаючи при визначенні її положення похибку меншу 5% [98]. В цьому випадку можна вважати, що зміни сили в часі (форма імпульсу) несуттєві і розглядати K_i як прямокутний імпульс, що з постійною еквівалентною силою P_e впливає на масу m_{np} протягом часу τ_0 : $K_i = P_e \tau_0$.

Для визначення імпульсу зовнішньої примусової сили можна використати вирази:

$$K_i = \sqrt{2E_a c_{жс}} \cdot \tau_0; \quad \sqrt{2E_a c_{жс}} = P_e, \quad (3.20)$$

де $P_e = \sqrt{2E_a c_{жс}}$ – зусилля стисненої пружини, приведене до перерізу плунжера S_{nl} (див. вираз (3.5)).

З урахуванням вищевикладеного зовнішній силовий вплив упродовж одного періоду T_y можна подати у вигляді:

$$P(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq \tau_{зан}, \\ P_e, & \tau_{зан} \leq t \leq \tau_0, \\ 0, & \tau_0 \leq t \leq T_y. \end{cases} \quad (3.21)$$

Беручи $\tau_{зан} = 0$, перетворюємо вираз (3.21) до вигляду:

$$P(t) = \begin{cases} P_e, & 0 \leq t \leq \tau_0, \\ 0, & \tau_0 \leq t \leq T_y. \end{cases} \quad (3.22)$$

Період T_y прикладання примусової сили $P(t)$ для ГП з віброзбудувачем “на вході” відповідає періоду спрацьовування останнього t_y :

$$T_y = t_y = t_{н.д.} + t'_p, \quad (3.23)$$

а мінімальне значення $T_{u,min}$ встановлюють з урахуванням (3.15), $t_{н.д.}$ – час набору тиску в гідросистемі до заданої величини.

Для забезпечення постійної роботи ІВПМ, період спрацьовування вібробуджувача повинен бути таким, щоб прикладання імпульсу K_i примусової сили до його рухомих ланок здійснювалось після завершення їх відносного переміщення.

Останнє можливо при виконанні умови $t'_u = \pi \sqrt{\frac{m_{np}}{c_y}}$, яка накладає

певні обмеження на вибір конструктивних параметрів машини.

3.3 Використання нечіткої логіки для оцінки ефективності функціонування технологічного комплексу віброударного пресування

Використання теорії нечіткої логіки не замінює традиційні методики моделювання, а навпаки вона використовується спільно з традиційними методиками і дозволяє спростити створення і розширити можливості традиційних методик. Переваги даної теорії заключаються на наступному:

- формалізується і об'єднується досвід операторів і конструкторів в налаштуванні петель регулювання [131];
- пропонується простий метод управління для складних процесів;
- постійно враховується досвід з моделювання процесами даного типу, беручи до уваги виключення різного роду і особливості системи;
- враховуються вихідні дані різного роду і виробляються об'єднання різних вихідних даних.

Тому, розробивши математичну модель для ІВПМ і оцінивши роботу його складових, ми переходимо до узагальненої моделі всього комплексу на основі вхідних та вихідних параметрів.

Процес оцінки ефективності функціонування технологічного комплексу, який складається з трьох систем, належить до категорії складних задач. Внаслідок цього виникає потреба в урахуванні потужної множини вхідних параметрів X , та вихідних параметрів N , та їхньої функції перетворення $F: X \rightarrow N$. Дані задачі розв'язуються шляхом декомпозиції складної функції на послідовність простіших так, що функції нижчих рівнів однозначно ідентифікують певні параметри у фун-

кціях вищих рівнів. Вирішення головної проблеми стає можливим тоді, коли отримуються розв'язки всіх підпроблем нижчих рівнів [116].

Оцінка ефективності функціонування процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні полягає в послідовній реалізації ряду функцій. Задача прийняття рішення щодо оцінки ефективності функціонування всього технологічного комплексу полягає у виборі адекватного рішення N з множини рішень Z_j ($j = \overline{1, \dots, J}$). Пропонується вибір здійснювати за допомогою оцінок ефективності функціонування технологічного комплексу на основі множини X оціночних параметрів x_i ($i = \overline{1, \dots, n}$, $n \in N$).

Для оцінки ефективності функціонування процесу необхідно вибрати певні критерії. Крім того, специфічністю побудови такої системи є необхідність врахування множини початкових вхідних параметрів, які є базою для розрахунку оціночних параметрів [11].

Особливість математичної моделі полягає в тому, що вона враховує множину початкових вхідних параметрів $K=(k_c)$ ($c = \overline{1, \dots, C}$); множину оціночних параметрів $X=(x_i)$ ($i = \overline{1, \dots, n}$) системи; функцію композиції, перетворення початкових параметрів на оцінювальні $F_I: K \rightarrow X$; множину декомпозиційних функцій $D=(Y, \dots, S, P)$ згортання параметрів, за якими здійснюється ідентифікація стану системи.

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:

$$K \xrightarrow{F_I} X \xrightarrow{D} Z_j.$$

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 [131]:

$$Z_j = F(P_1, \dots, P_q). \quad (3.24)$$

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:

$$P_1 = F(S_1, \dots, S_t), \quad P_q = F(S_e, \dots, S_p), \quad (3.25)$$

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

У результаті подальшого розбиття, що зумовлюється врахуванням впливу постійно змінюваної множини чинників зовнішнього та внутрішнього середовищ, складні параметри передостаннього рівня (Y_1, \dots, Y_m) є функціями від відповідних оціночних параметрів x_i стану, зокрема:

$$Y_1 = f(x_1, \dots, x_l), \quad \dots, \quad Y_m = f(x_k, \dots, x_n), \quad (3.26)$$

де $l, k, n \in N$.

При цьому оціночні параметри x_i визначаються на базі множини початкових вхідних параметрів K і функції перетворення $F_1: X = F_1(K)$, $K = (k_c), c = \overline{1, \dots, C}$; $X = (x_i), i = \overline{1, \dots, n}$.

Виходячи зі складених функцій (3.24)–(3.26), необхідно сформулювати множину X відповідних параметрів для оцінки ефективності функціонування всього технологічного процесу. Ця множина формується за допомогою множини початкових вхідних K параметрів (k_1, \dots, k_e), де $e \in N$. Визначення даної множини K здійснюється за допомогою аналізу системи.

На основі вищевикладеного запропоновано наступну загальну структурну модель (рис. 3.6) оцінки ефективності функціонування процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом [131].

На першому етапі здійснюється формування множини K початкових вхідних параметрів всього технологічного комплексу. Другий етап передбачає формування множини X оцінювальних параметрів стану кожної системи на базі множини K початкових вхідних параметрів [11]. На третьому і наступних проміжних етапах, зокрема S і P , відбувається формування складних узагальнених показників оцінювання ефективності функціонування кожної системи $Y_1, \dots, Y_m; S_1, \dots, S_p; P_1, \dots, P_q$. На найвищому етапі A ідентифікується рішення $Z_j, j = \overline{1, \dots, J}$, яке визначає ефективність функціонування всього технологічного комплексу.

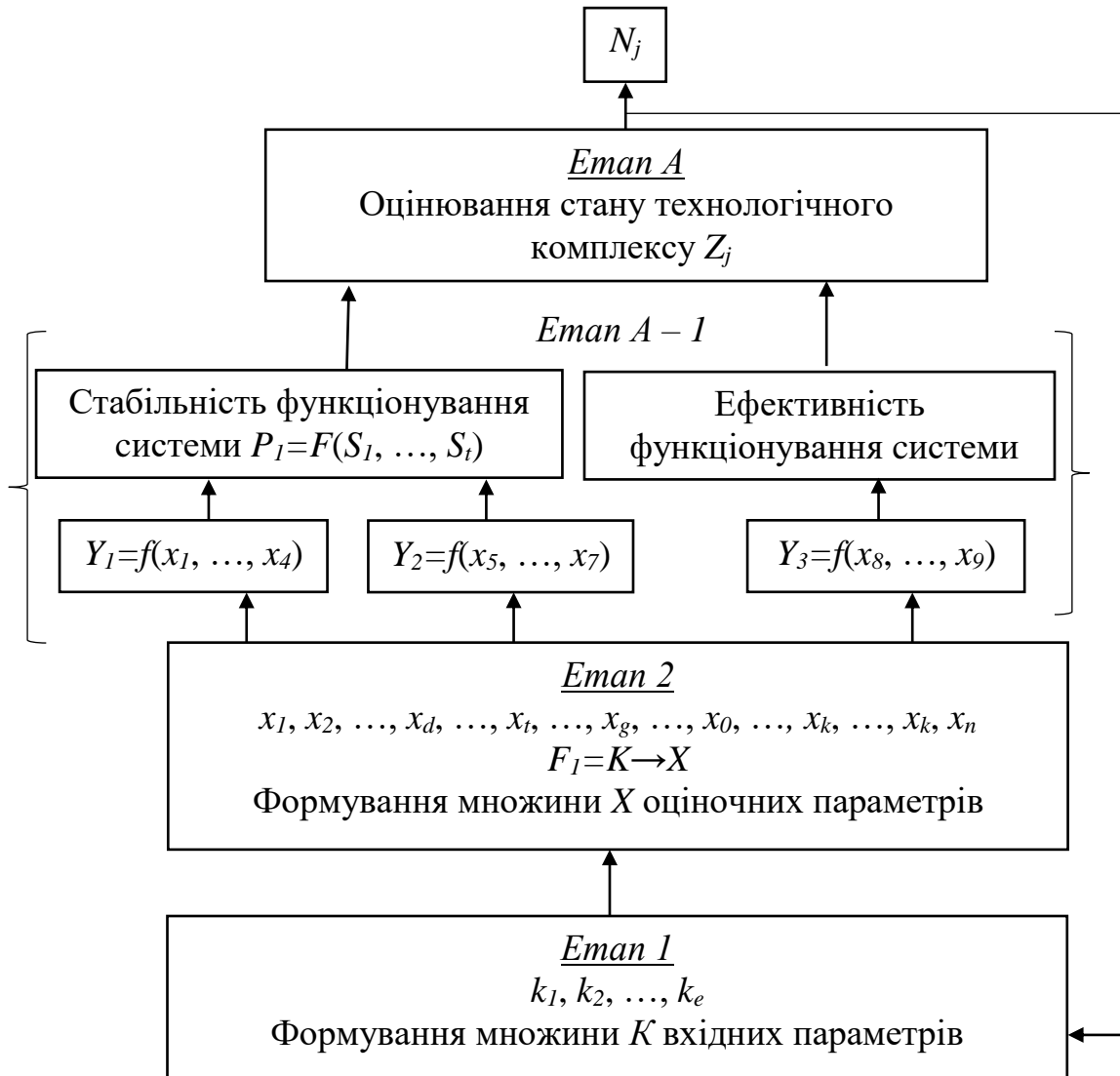


Рис. 3.6. Загальна структурна модель процесу оцінювання ефективності процесу формоутворення заготовок на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом

Така структура загальної математичної моделі дозволяє як додавати, так і видаляти аналізовані показники, враховуючи складність системи. Крім того, ієрархічність запропонованої моделі дозволяє спростити процес оцінювання з використанням сучасного математичного апарату.

Для визначення функцій (3.41)–(3.43) необхідно сформулювати множини вхідних та вихідних параметрів. Ці множини повинні охоплювати широкий спектр параметрів впливу, а також задовольняти умови повноти, дієвості та мінімальності. За критерієм повноти необхідно обрати таку кількість параметрів, щоб вона в повному обсязі охоплю-

вала весь технологічний комплекс і вилучення хоча б одного з обраних параметрів змінювало б результат. Як показав аналіз існуючих методів оцінки ефективності функціонування нашого технологічного комплексу та використаних у них параметрів, найбільш широко та повно оцінюють функціонування процесу такі групи параметрів:

- середня щільність заготовки – ρ , кг/м³;
- лінійний середньостатистичний розмір частинки матеріалу – a , м;
- геометричний фактор для початкового стану заготовки – R_0 , м;
- динамічний модуль умовної пружності матеріалу заготовки – K_{zi} , МПа;
- площа відкритої поверхні з боку пуансона – $S_{заг}$, м²;
- висота заготовки – h_{zi} , м;
- тривалість ударного імпульсу при віброударному навантаженні – τ_0 , с;
- зусилля додаткового статичного навантаження заготовки – $P_{ст}$, Н;
- максимальне зусилля навантаження заготовки – $F_{з.мах}$, Н;
- загальне число ходів робочого столу ІВПМ – n ;
- частота коливань заготовки при віброударному навантаженні – f_p , Гц;
- енергія одноциклового гідроаккумулятора – E_a , Дж;
- об'єм гідросистеми ІВПМ – W_a , м³;
- тиск в напірній порожнині гідросистеми ІВПМ – p , МПа;
- коефіцієнт пружності матеріалу заготовки – $K_{пр}$, Па;
- маса заготовки – m , кг;
- жорсткість пружин повернення – c_y , Н/м.

За критерієм дієвості і мінімальності, на базі сформованої множини (за критерієм повноти), було звужено множину окреслених за двома попередніми критеріями параметрів до множини $X=(x_1, \dots, x_9)$. Отже, множина оціночних параметрів X забезпечує формування таких складових параметрів які оцінюють систему: I (заготовка) – Y_1 , система II (робочий режим) – Y_2 , система III (машина ІВПМ) – Y_3 .

$Y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ характеризується оціночними параметрами: x_1 – середня щільність заготовки (ρ , кг/м³), x_2 – лінійний середньостатистичний розмір частинки матеріалу (a , м), x_3 – геометричний фактор

для початкового стану заготовки (R_0, m), x_4 – площа відкритої поверхні з боку пуансона ($S_{заг}, m^2$).

$Y_2 = f(x_5, x_6, x_7)$ характеризується оціночними параметрами: x_5 – тривалість ударного імпульсу (τ_0, c), x_6 – зусилля додаткового статичного навантаження заготовки ($P_{ст}, H$), x_7 – повний час робочого процесу ($t_{вyn}, c$).

$Y_3 = f(x_8, x_9)$ характеризується оціночними параметрами: x_8 – енергія одноциклового гідроаккумулятора ($E_a, Дж$), x_9 – сумарна інерційна маса.

Щільність заготовки являє собою функцію x_1 , визначається за допомогою параметрів:

- $k_1 (m_{заг})$ – маса навішування порошкового матеріалу;
- $k_2 (W_a)$ – об'єм заготовки після завершення її формоутворення.

Лінійний середньостатистичний розмір частинки матеріалу являє собою функцію $x_2 = k_3(a)$ – лінійний середньостатистичний розмір частинки матеріалу.

Геометричний фактор для початкового стану заготовки являє собою функцію $x_3 = k_4(R_0)$ – геометричний фактор для початкового стану заготовки.

Площа відкритої поверхні з боку пуансона являє собою функцію $x_4 = k_5(S_{заг})$.

Питоме статичне зусилля являє собою функцію x_5 , яка визначається за допомогою параметрів:

- $k_6 (m)$ – сумарна інерційна маса;
- $k_7 (g)$ – прискорення вільного падіння;
- $k_5 (S_{заг})$ – площа відкритої поверхні з боку пуансона.

Тривалість ударного імпульсу, що являє собою функцію x_6 , яка визначається сукупністю параметрів:

- $k_8 (h_{30})$ – висота заготовки у початковий момент ВУП;
- $k_9 (h_{3к})$ – висота заготовки у кінцевий момент ВУП;
- $k_{10} (H_{30})$ – модуль умовної пружності заготовки у початковий момент ВУП;
- $k_{11} (H_{3к})$ – модуль умовної пружності заготовки у кінцевий момент ВУП;
- $k_{12} (\rho_{30})$ – середня щільність заготовки у початковий момент ВУП;

– $k_{13} (\rho_{зк})$ – середня щільність заготовки у кінцевий момент ВУП.

Повний час робочого ходу x_7 , визначається за допомогою параметрів:

– $k_{14} (n)$ – загальне число ходів робочого столу;

– $k_{15} (f)$ – частота коливань заготовки при віброударному навантаженні.

Енергія одноциклового гідроаккумулятора, що являє собою функцію x_8 , визначається за допомогою параметрів:

– $k_{16} (p)$ – тиск в напірній лінії гідросистеми ІВПМ;

– $k_{17} (W_0)$ – об'єм гідросистеми ІВПМ;

– $k_{18} (K_{np})$ – коефіцієнт пружності робочої рідини гідросистеми ІВПМ.

Інерційна маса являє собою функцію $x_9 = k_{19} (m)$.

Оцінювальні параметри обчислюються на основі початкових вхідних параметрів. На основі цих вхідних параметрів формується множина X кількісних параметрів всього процесу (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Множина параметрів технологічного комплексу віброударного пресування

| Назва показника | Позначення показника | Вхідні параметри |
|---|----------------------|--|
| $Y_1 - I$ (заготовка) | | |
| Середня щільність заготовки (ρ , кг/м ³) | x_1 | k_1/k_2 |
| Лінійний середньостатичний розмір частинки матеріалу (a , м) | x_2 | k_3 |
| Геометричний фактор початкового стану заготовки (R_0 , м) | x_3 | k_4 |
| Площа відкритої поверхні з боку пуансона ($S_{заг}$, м ²) | x_4 | k_5 |
| $Y_2 - \text{система II}$ (робочий режим) | | |
| Тривалість ударного імпульсу (τ_0 , с) | x_5 | $\frac{2k_8 k_9}{k_8 \sqrt{\frac{k_{10}}{k_{12}}} - k_9 \sqrt{\frac{k_{11}}{k_{13}}}}$ |
| Питоме статичне зусилля (P_{cm} , МПа) | x_6 | $k_6 \cdot (k_7/k_5)$ |

Продовження таблиці 3.1

| | | |
|--|-------|-------------------------------|
| Повний час робочого процесу (t_{syn} , с) | x_7 | k_{14}/k_{15} |
| Y_3 – система III (машина ІВПМ) | | |
| Енергія одноциклового гідроакумулятора (E_a , Дж) | x_8 | $(k_{16}^2 k_{17})/(2k_{18})$ |
| Сумарна інерційна маса (m , кг) | x_9 | k_{19} |

Таким чином, визначено множину оцінювальних параметрів x_i ($i = \overline{1, \dots, 9}$), а саме: (x_1, \dots, x_9) , значення яких обчислюються на базі вхідних початкових параметрів (k_1, \dots, k_{19}) .

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 [11, 116, 131]. Розглядаючи кожне з Z_j ($j = \overline{1, \dots, 5}$) рішень ($Z_1=[1,0; 0,80)$ – відмінний; $Z_2=[0,80; 0,60)$ – нормальний; $Z_3=[0,60; 0,40)$ – задовільний; $Z_4=[0,40; 0,20)$ – критичний; $Z_5=[0,20; 0]$ – незадовільний) приймаємо рішення про ефективність функціонування даної технологічної системи.

З огляду на вищенаведене обґрунтування множин параметрів, подано таку уточнену структурну модель процесу оцінювання ефективності процесу формоутворення заготовок на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом (рис. 3.7).

3.5 Метод оцінювання стану технологічного комплексу на базі математичного апарату нечітких множин

Для побудови методу оцінювання стану технологічного комплексу для заданих параметрів системи (табл. 3.2) на основі нечітких множин запишемо такі етапи [116]:

Визначимо множину T оцінювальних лінгвістичних термів, що являє собою сукупність значень лінгвістичних змінних. Лінгвістична змінна – змінна, яка приймає значення з множини слів або словосполучень будь-якої мови [11]. В нашому випадку лінгвістична змінна це – ефективність технологічного комплексу (заготовка – робочий процес – машина).

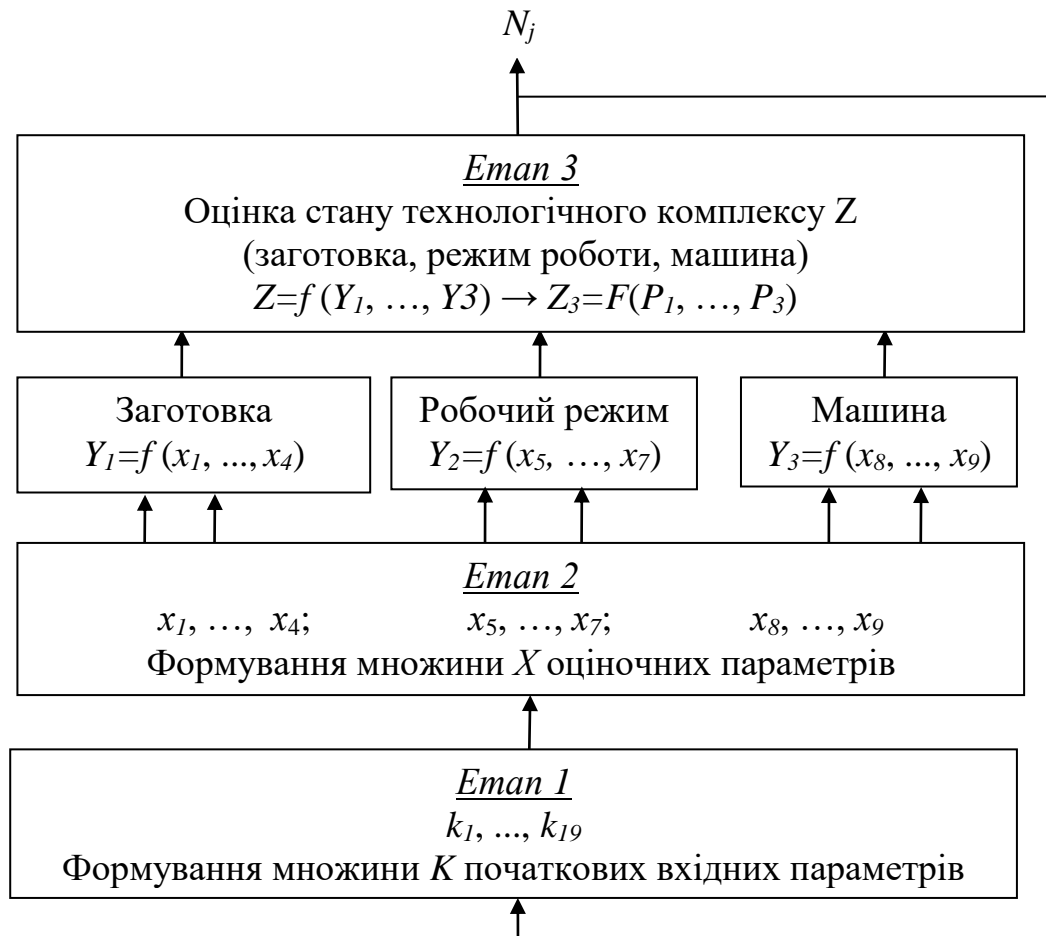


Рис. 3.7. Уточнена структурна модель процесу оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу

Таблиця 3.2

Множина параметрів технологічного комплексу віброударного пресування

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 |
|------------------|-----------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|
| $2,9 \cdot 10^3$ | 10^{-3} | 1,3 | 0,0022 | 0,119 | 0,0085 | 2,51 | 38,4 | 1 |

Для багатьох задач, що розв’язуються в межах людиномашинних систем, точність отриманого розв’язку щодо рівня працездатного стану системи дозволяє ідентифікувати достатність трьох – Н (низький), С (середній), В (високий) ($T = 3$) – або 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. Такий вибір кількості термів зумовлюється також тим, що адекватні і точні рішення приймаються навіть кваліфікованішими експертами з ураху-

ванням 7 ± 2 аналізованих чинників. Наявність хоча б 2-х характеристичних параметрів для кожного терма, вже зумовлює необхідність врахувати 6 (при $T=3$) або 10 (при $T=5$) характеристичних параметрів при прийнятті рішення щодо отримання оцінки ефективного функціонування системи, кількість яких зростає з ростом T . Отже, така кількість лінгвістичних термів є достатньою.

Далі побудуємо графіки функцій належності $\mu^{Z_j}(x_i)$, $j = \overline{1, \dots, J}$ значень параметрів (x_1, \dots, x_9) лінгвістичним термам у загальному вигляді.

Для кожного лінгвістичного терма задамо функцію належності, виходячи з варіантів функцій, що наведені у праці [11]. Експертами була надана інформація, що специфіка обраних параметрів полягає в тому, що при їх змінні в певному проміжку значення функції не змінюється, а за межами цього проміжку існує нелінійна залежність.

Таким чином, отримаємо функції належності трьох нечітких термів для параметрів x_2, x_3, x_4, x_9 і п'яти термів для параметрів x_1, x_5, x_6, x_7, x_8 , які зображено на рисунку 3.8.

Було визначено, що для деяких показників доцільно використати три нечіткі терми, оскільки діапазони зміни таких показників невеликі (в межах від 0 до 1). А для показників, діапазони зміни яких ширше, було запропоновано використовувати п'ять нечітких термів.

З урахуванням різної компетентності експертів визначимо агреговані значення характеристичних точок $a, a_1, b, b_1, c, c_1, d, d_1, k, k_1$ для T лінгвістичних термів для параметрів x_1, \dots, x_9 .

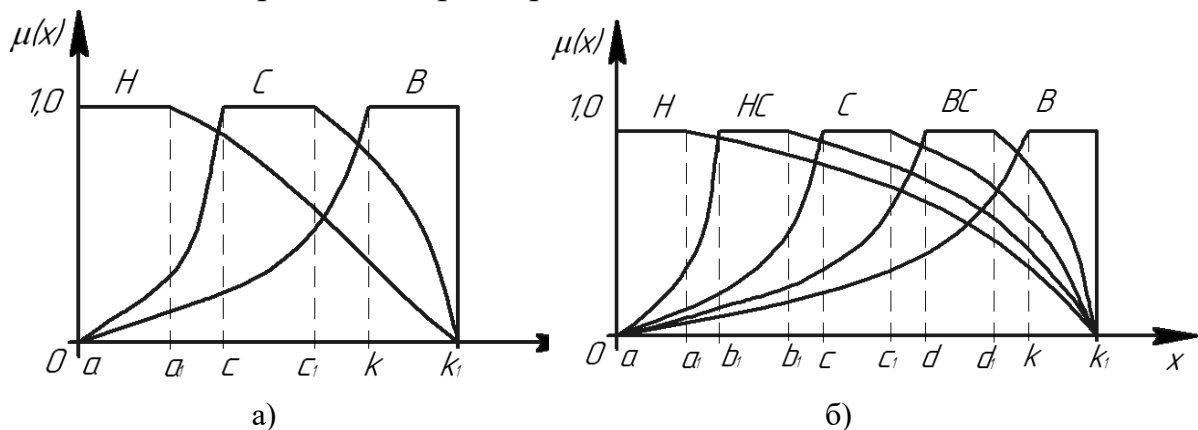


Рис. 3.8. Діаграми функції належності:

а – трьох нечітких термів для параметрів x_2, x_3, x_4, x_9 ; б – п'яти нечітких термів для параметрів x_1, x_5, x_6, x_7, x_8

Агреговане значення параметру $Z_{S1}=2,1$ для показника x_1 (середня щільність заготовки $\rho=2,1 \dots 2,9$ г/см³) визначаємо за формулою:

$$a = \sum_{s=1}^d k_{ns} \cdot Z_{S1} = \sum_{s=1}^1 1 \cdot 2,1 = 2,1, \quad (3.27)$$

де $k_{ns} = 1$ – компетентність s -го експерта; $Z_{S1} = 2,1$ – значення параметра, надане s -м експертом.

Аналогічно визначаємо агреговані значення для інших параметрів $a, a_1, b, b_1, c, c_1, d, d_1, k, k_1$ для показника x_1 (середня щільність заготовки $\rho=2,1 \dots 2,9$ г/см³): $a_1 - Z_{S1} = 2,3$; $b - Z_{S2} = 2,5$; $b_1 - Z_{S3} = 2,5$; $c - Z_{S4} = 2,5$; $c_1 - Z_{S5} = 2,7$; $d - Z_{S6} = 2,6$; $d_1 - Z_{S7} = 2,7$; $k - Z_{S8} = 2,8$; $k_1 - Z_{S9} = 2,9$.

Аналогічним чином визначаємо агреговані значення цих параметрів для усіх інших показників x_2, \dots, x_9 .

Для T лінгвістичних термів для оцінювальних параметрів (x_1, \dots, x_9) складемо таблиці значень (табл. 3.3, 3.4) характеристичних точок $a, a_1, b, b_1, c, c_1, d, d_1, k, k_1$ побудовану кожним із залучених експертів. Кожен з них надав своє бачення діапазону значень (a, \dots, k_1).

Таблиця 3.3

Значення параметрів a, \dots, k_1 , надані експертами s_1, \dots, s_3 , для показників x_2, x_3, x_4, x_9

| Показники | Експерти | Параметри | | | | | |
|---|--------------|-----------|-------|------|-------|-----|-------|
| | | a | a_1 | c | c_1 | k | k_1 |
| x_2 (лінійний середньо-статистичний розмір частинок матеріалу, $a \cdot 10^{-5}$, м) | s_1 | 0 | 75 | 81 | 85 | 95 | 100 |
| | s_2 | 0 | 77 | 83 | 86 | 98 | 100 |
| | s_3 | 0 | 73 | 76 | 84 | 92 | 100 |
| | Σk_3 | 0 | 75 | 80 | 85 | 95 | 100 |
| x_3 (геометричний фактор початкового стану заготовки R_0 , м) | s_1 | 0 | 1,0 | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,8 |
| | s_2 | 0 | 1,0 | 1,23 | 1,25 | 1,4 | 1,5 |
| | s_3 | 0 | 1,0 | 1,07 | 1,1 | 1,2 | 1,2 |
| | Σk_3 | 0 | 1,0 | 1,2 | 1,25 | 1,4 | 1,5 |
| x_4 (площа відкритої поверхні, $S_0 \cdot 10^{-3}$, м ²) | s_1 | 0 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,4 |
| | s_2 | 0 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,4 |
| | s_3 | 0 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,4 |
| | Σk_3 | 0 | 1,9 | 2,0 | 2,1 | 2,3 | 2,4 |

Продовження таблиці 3.3

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| x_9 (інерційна маса, m , кг) | s_1 | 0 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,5 |
| | s_2 | 0 | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 1,4 | 1,5 |
| | s_3 | 0 | 1,1 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| | Σk_3 | 0 | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,5 |

Таблиця 3.4

Значення параметрів a, \dots, k_1 , надані експертами s_1, \dots, s_3 , для показників x_1, x_5, x_6, x_7, x_9

| Показники | Експерти | Параметри | | | | | | | | | |
|---|--------------|-----------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| | | a | a_1 | b | b_1 | c | c_1 | d | d_1 | k | k_1 |
| x_1 (середня щільність заготовки, $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³) | s_1 | 0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 |
| | s_2 | 0 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 |
| | s_3 | 0 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 | 2,9 |
| | Σk_3 | 0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 |
| x_5 (питоме статичне зусилля, $P_{ст}$, МПа) | s_1 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,15 | 0,15 |
| | s_2 | 0 | 0,09 | 0,1 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,15 |
| | s_3 | 0 | 0,1 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,15 |
| | Σk_3 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,11 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,15 |
| x_6 (тривалість ударного імпульсу, $\tau_0 \cdot 10^{-3}$, с) | s_1 | 0 | 8,0 | 8,1 | 8,1 | 8,2 | 8,2 | 8,3 | 8,4 | 8,5 | 8,6 |
| | s_2 | 0 | 8,1 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,6 | 8,6 | 7,0 | 7,9 |
| | s_3 | 0 | 9,0 | 9,3 | 9,3 | 9,1 | 9,1 | 9,2 | 9,1 | 11,6 | 11,0 |
| | Σk_3 | 0 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,6 | 8,6 | 8,7 | 8,7 | 8,8 | 8,9 |
| x_7 (повний час робочого процесу, $t_{вуп}$, с) | s_1 | 0 | 3 | 3,5 | 3,8 | 4 | 4,2 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 |
| | s_2 | 0 | 3 | 3,2 | 3,4 | 3,5 | 4,5 | 4,8 | 5 | 6 | 7 |
| | s_3 | 0 | 3 | 3,5 | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 6,5 | 8 |
| | Σk_3 | 0 | 3 | 3,4 | 3,7 | 4,6 | 4,6 | 4,9 | 5,3 | 6,3 | 7 |
| x_8 (енергія одноциклового гідроаккумулятора, E_a , Дж) | s_1 | 0 | 34,2 | 35 | 36 | 40,0 | 48,2 | 50 | 55 | 60,0 | 85,8 |
| | s_2 | 0 | 33,6 | 33,5 | 36 | 35,5 | 40,4 | 43 | 52 | 60,0 | 91,6 |
| | s_3 | 0 | 35 | 35 | 42 | 44,5 | 56 | 57 | 58 | 60 | 80 |
| | Σk_3 | 0 | 34,2 | 34,5 | 38 | 40,0 | 48,2 | 50 | 55 | 60,0 | 85,8 |

Визначимо математичні формули, що описують функції належності μ^{Z_j} :

$$\mu^H(x) = \begin{cases} 1, & x \in [a, a_1]; \\ \left(\frac{k_1 - x}{k_1 - a_1}\right)^{0,8}, & x \in [a_1, k_1], \end{cases} \quad \mu^{HC}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - a}{b - a}\right)^{1,2}, & x \in [a, b]; \\ 1, & x \in (b, b_1); \\ \left(\frac{k_1 - x}{k_1 - b_1}\right)^{0,8}, & x \in [b_1, k_1], \end{cases}$$

$$\mu^C(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - a}{c - a}\right)^{1,2}, & x \in [a, c]; \\ 1, & x \in (c, c_1); \\ \left(\frac{k_1 - x}{k_1 - c_1}\right)^{0,8}, & x \in [c_1, k_1], \end{cases} \quad \mu^{BC}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - a}{d - a}\right)^{1,2}, & x \in [a, d]; \\ 1, & x \in (d, d_1); \\ \left(\frac{k_1 - x}{k_1 - d_1}\right)^{0,8}, & x \in [d_1, k_1], \end{cases}$$

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

У цих рівняннях вибрано, з урахуванням думок експертів, степеневі коефіцієнти 1,2 та 0,8, що наближують дані функції до реальних залежностей [11, 116, 131].

Визначимо значення функцій належності параметру x_1 для п'яти нечітких термів:

$$\mu^H(x_1) = \begin{cases} 1, & x \in [a, a_1]; \\ \left(\frac{k_1 - x_1}{k_1 - a_1}\right)^{0,8}, & x \in [a_1, k_1] \end{cases} = \begin{cases} 1, & x \in [0, 2,1); \\ \left(\frac{2,9 - 0,3}{2,9 - 2,1}\right)^{0,8}, & x \in [2,1; 2,9] \end{cases} = 1;$$

$$\mu^{HC}(x_1) = \begin{cases} \left(\frac{x_1 - a}{b - a}\right)^{1,2}, & x \in [a, b]; \\ 1, & x \in (b, b_1); \\ \left(\frac{k_1 - x_1}{k_1 - b_1}\right)^{0,8}, & x \in [b_1, k_1] \end{cases} = \begin{cases} \left(\frac{x_1}{2,2}\right)^{1,2}, & x \in [2,1; 2,2]; \\ 1, & x \in (2,2; 2,3); \\ \left(\frac{2,9 - x_1}{2,9 - 2,3}\right)^{0,8}, & x \in [2,3; 2,9] \end{cases} = 0,091;$$

$$\mu^C(x_1) = \begin{cases} \left(\frac{x_1 - a}{c - a}\right)^{1,2}, & x \in [a, c]; \\ 1, & x \in (c, c_1); \\ \left(\frac{k_1 - x_1}{k_1 - c_1}\right)^{0,8}, & x \in [c_1, k_1], \end{cases} = \begin{cases} \left(\frac{0,3}{2,4}\right)^{1,2}, & x \in [0; 2,4]; \\ 1, & x_1 \in (2,4; 2,5); \\ \left(\frac{2,9 - 0,3}{2,9 - 2,5}\right)^{0,8}, & x \in [2,5; 2,9] \end{cases} = 0,082;$$

$$\mu^{BC}(x_1) = \begin{cases} \left(\frac{x_1 - a}{d - a}\right)^{1,2}, & x_1 \in [a, d]; \\ 1, & x_1 \in (d, d_1); \\ \left(\frac{k_1 - x_1}{k_1 - d_1}\right)^{0,8}, & x_1 \in [d_1, k_1] \end{cases} = \begin{cases} \left(\frac{0,3}{2,6}\right)^{1,2}, & x_1 \in [0; 2,6]; \\ 1, & x_1 \in (2,6; 2,7); \\ \left(\frac{2,9 - 0,3}{2,9 - 2,7}\right)^{0,8}, & x_1 \in [2,7; 2,9] \end{cases} = 0,0746;$$

$$\mu^B(x_1) = \begin{cases} \left(\frac{x_1 - a}{k - a}\right)^{1,2}, & x_1 \in [a, k]; \\ 1, & x_1 \in (k, k_1] \end{cases} = \begin{cases} \left(\frac{0,3}{2,8}\right)^{1,2}, & x_1 \in [0; 2,8]; \\ 1, & x_1 \in (2,8; 2,9] \end{cases} = 0,068.$$

Визначаємо значення функцій належності параметрів x_5, x_6, x_7, x_8 для п'яти нечітких термів і зведемо їх до таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Значення функцій належності параметрів x_1, x_5, x_6, x_7, x_8

| i | x_i | $\mu^H(x_i)$ | $\mu^{HC}(x_i)$ | $\mu^C(x_i)$ | $\mu^{BC}(x_i)$ | $\mu^B(x_i)$ |
|-----|---------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 1 | 0,3 | 1 | 0,091 | 0,082 | 0,0746 | 0,068 |
| 5 | 0,119 | 0,68 | 0,816 | 0,990 | 0,099 | 0,091 |
| 6 | 0,00085 | 0,837 | 1 | 0,985 | 0,972 | 0,958 |
| 7 | 2,51 | 1 | 0,694 | 0,484 | 0,448 | 0,694 |
| 8 | 38,4 | 0,935 | 0,991 | 1,012 | 0,729 | 0,585 |

Визначаємо значення функцій належності параметрів x_2, x_3, x_4, x_9 для трьох нечітких термів і зводимо їх до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Значення функцій належності параметрів x_2, x_3, x_4, x_9

| i | x_i | $\mu^H(x_i)$ | $\mu^C(x_i)$ | $\mu^B(x_i)$ |
|-----|--------|--------------|--------------|--------------|
| 2 | 0,3 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 1,3 | 0,48 | 0,836 | 0,915 |
| 4 | 0,0022 | 0,48 | 0,723 | 0,949 |
| 9 | 1 | 1 | 0,8 | 0,667 |

Складемо матриці знань для оцінювання груп Y_1, Y_2, Y_3 параметрів ефективності функціонування технологічного комплексу для кожного лінгвістичного терму, використовуючи інформацію, що була надана експертами і значень функцій належності (табл. 3.5 і 3.6). Матриця знань для групи показників Y_1 (заготовка) подана у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Матриця знань для системи I (Y_1 – заготовка)

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | Y_1 |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| В | В | В | В | В |
| ВС | В | В | В | |
| С | В | В | В | |
| В | В | С | В | |
| В | В | В | С | |
| В | С | В | В | |
| ВС | В | С | В | |
| ВС | С | С | В | |
| ВС | В | С | С | |
| В | С | В | С | |
| С | С | В | В | |
| С | В | В | С | |
| В | С | С | Н | С |
| ВС | С | С | С | |
| С | С | С | С | |
| НС | С | С | С | |
| Н | В | С | В | |
| С | Н | С | С | |
| ВС | НС | Н | Н | |
| С | С | Н | Н | |
| НС | С | Н | С | |
| Н | Н | С | С | |
| НС | С | С | Н | |
| ВС | Н | Н | С | |
| Н | Н | Н | Н | Н |
| С | Н | Н | Н | |
| НС | Н | Н | Н | |
| Н | Н | Н | С | |
| Н | С | Н | Н | |
| Н | Н | С | Н | |

Матриці знань для оцінювання груп параметрів (Y_2, Y_3) ефективності функціонування вібропресової машини, а також його остаточної оцінки наведені у таблицях 3.8 і 3.9.

Таблиця 3.8

Матриця знань для системи II (Y_2 – робочий режим)

| x_5 | x_6 | x_7 | Y_2 |
|-------|-------|-------|-------|
| B | B | B | B |
| C | B | B | |
| B | C | B | |
| B | B | C | |
| BC | B | B | |
| B | BC | B | |
| C | BC | B | |
| B | BC | C | |
| B | C | BC | |
| BC | BC | BC | |
| BC | B | C | |
| C | B | BC | |
| B | C | C | C |
| C | BC | C | |
| C | C | BC | |
| H | C | B | |
| C | BC | C | |
| C | HC | BC | |
| C | C | H | |
| C | H | C | |
| H | C | C | |
| C | HC | H | |
| H | BC | HC | |
| HC | H | BC | |
| H | H | H | H |
| C | H | H | |
| H | HC | H | |
| H | H | C | |
| H | C | H | |
| H | H | HC | |

Матриця знань для системи III (Y_3 – машина)

| x_8 | x_9 | Y_3 |
|-------|-------|-------|
| В | В | В |
| ВС | В | |
| В | С | |
| ВС | С | |
| С | В | |
| В | С | |
| ВС | В | |
| В | С | |
| НС | В | |
| ВС | С | |
| С | В | |
| Н | В | |
| В | С | С |
| ВС | С | |
| С | С | |
| Н | С | |
| ВС | Н | |
| НС | С | |
| НС | С | |
| С | Н | |
| ВС | С | |
| НС | Н | |
| ВС | С | |
| НС | С | |
| Н | Н | Н |
| С | Н | |
| НС | С | |
| ВС | Н | |
| Н | Н | |
| С | Н | |

Складемо матрицю знань для остаточної оцінки технологічного комплексу Z_j груп параметрів Y_1, Y_2, Y_3 ефективності функціонування

технологічного комплексу для кожного лінгвістичного терму (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

Матриця знань для оцінки технологічного комплексу Z_j

| Y_1 | Y_2 | Y_3 | Z |
|-------|-------|-------|-----|
| B | B | B | B |
| B | B | BC | |
| BC | B | B | |
| B | BC | B | |
| B | B | C | |
| C | B | B | |
| C | BC | B | |
| B | BC | C | |
| C | B | BC | |
| BC | C | BC | |
| BC | BC | C | |
| C | B | B | |
| C | C | C | C |
| C | BC | C | |
| C | C | BC | |
| BC | C | C | |
| C | C | B | |
| B | C | C | |
| C | C | H | |
| C | H | C | |
| H | C | C | |
| C | HC | H | |
| H | BC | HC | |
| HC | H | BC | |
| H | H | H | H |
| C | H | H | |
| H | HC | H | |
| H | H | C | |
| H | C | H | |
| HC | H | H | |

На кінцевому етапі опишемо побудовані матриці логічними рівняннями, що пов'язують функції належності змінних Y_1, Y_2, Y_3 та Z_j , використовуючи методику, що наведена в [11].

Враховуючи ваги параметрів x_1, \dots, x_9 , визначені і обґрунтовані у підрозділі 3.4., запишемо логічне рівняння для групи показників Y_1 – заготовка, що описує:

– високий терм:

$$\begin{aligned} \mu^b(Y_1) &= \mu^b(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^b(x_3) \times \mu^b(x_4) \vee \mu^{bc}(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^b(x_3) \times \\ &\times \mu^b(x_4) \vee \mu^c(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^b(x_3) \times \mu^b(x_4) \vee \mu^b(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \\ &\times \mu^b(x_4) \vee \mu^b(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^b(x_3) \times \mu^c(x_4) \vee \mu^b(x_1) \times \mu^c(x_2) \times \mu^b(x_3) \times \\ &\times \mu^b(x_4) = 0,068 \times 1 \times 0,915 \times 0,949 \vee 0,0746 \times 1 \times 0,915 \times 0,949 \vee 0,082 \times \\ &\times 1 \times 0,915 \times 0,929 \vee 0,068 \times 1 \times 0,836 \times 0,949 \vee 0,068 \times 1 \times 0,915 \times 0,949 \vee \\ &\vee 0,068 \times 0 \times 0,915 \times 0,949 = 0,068 \vee 0,0746 \vee 0,082 \vee 0,068 \vee 0,068 \vee \\ &\vee 0 = 0,082; \end{aligned}$$

– терм вище середнього:

$$\begin{aligned} \mu^{bc}(Y_1) &= \mu^{bc}(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \mu^b(x_4) \vee \mu^{bc}(x_1) \times \mu^c(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \\ &\times \mu^b(x_4) \vee \mu^{bc}(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \mu^c(x_4) \vee \mu^b(x_1) \times \mu^c(x_2) \times \mu^b(x_3) \times \\ &\times \mu^c(x_4) \vee \mu^c(x_1) \times \mu^c(x_2) \times \mu^b(x_3) \times \mu^b(x_4) \vee \mu^c(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^b(x_3) \times \\ &\times \mu^c(x_4) = 0,0746 \times 1 \times 0,836 \times 0,949 \vee 0,0746 \times 0 \times 0,836 \times 0,949 \vee 0,0746 \times \\ &\times 1 \times 0,836 \times 0,723 \vee 0,068 \times 0 \times 0,915 \times 0,723 \vee 0,082 \times 0 \times 0,915 \times 0,949 \vee \\ &\vee 0,082 \times 1 \times 0,915 \times 0,723 = 0,0746 \vee 0 \vee 0,0746 \vee 0 \vee 0 \vee 0,082 = 0,082; \end{aligned}$$

– середній терм:

$$\begin{aligned} \mu^c(Y_1) &= \mu^b(x_1) \times \mu^c(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \mu^h(x_4) \vee \mu^{bc}(x_1) \times \mu^c(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \\ &\times \mu^c(x_4) \vee \mu^c(x_1) \times \mu^c(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \mu^c(x_4) \vee \mu^{hc}(x_1) \times \mu^c(x_2) \times \mu^{hc}(x_3) \times \\ &\times \mu^c(x_4) \vee \mu^h(x_1) \times \mu^b(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \mu^b(x_4) \vee \mu^c(x_1) \times \mu^h(x_2) \times \mu^c(x_3) \times \\ &\times \mu^c(x_4) = 0,068 \times 0 \times 0,836 \times 0,48 \vee 0,0746 \times 0 \times 0,836 \times 0,949 \vee 0,082 \times 0 \times \\ &\times 0,836 \times 0,723 \vee 0,091 \times 0 \times 0,48 \times 0,723 \vee 1 \times 1 \times 0,836 \times 0,949 \vee 0,082 \times 0 \times \\ &\times 0,836 \times 0,723 = 0 \vee 0 \vee 0 \vee 0 \vee 0,836 \vee 0 = 0,836; \end{aligned}$$

– терм нижче середнього:

$$\begin{aligned} \mu^{HC}(Y_1) &= \mu^{6C}(x_1) \times \mu^{HC}(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \mu^H(x_4) \vee \mu^C(x_1) \times \mu^C(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \\ &\times \mu^H(x_4) \vee \mu^{HC}(x_1) \times \mu^C(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \mu^C(x_4) \vee \mu^H(x_1) \times \mu^H(x_2) \times \mu^C(x_3) \times \\ &\times \mu^C(x_4) \vee \mu^{HC}(x_1) \times \mu^C(x_2) \times \mu^C(x_3) \times \mu^H(x_4) \vee \mu^{6C}(x_1) \times \mu^H(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \\ &\times \mu^C(x_4) = 0,0746 \times 0 \times 0,48 \times 0,48 \vee 0,082 \times 0 \times 0,48 \times 0,48 \vee 0,091 \times 0 \times 0,48 \times \\ &\times 0,723 \vee 1 \times 0 \times 0,836 \times 0,723 \vee 0,091 \times 0 \times 0,836 \times 0,48 \vee 0,0746 \times 0 \times 0,48 \times \\ &\times 0,723 = 0 \vee 0 \vee 0 \vee 0 \vee 0 \vee 0 = 0; \end{aligned}$$

– низький терм:

$$\begin{aligned} \mu^H(Y_1) &= \mu^H(x_1) \times \mu^H(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \mu^H(x_4) \vee \mu^C(x_1) \times \mu^H(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \\ &\times \mu^H(x_4) \vee \mu^{HC}(x_1) \times \mu^H(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \mu^H(x_4) \vee \mu^H(x_1) \times \mu^H(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \\ &\times \mu^C(x_4) \vee \mu^H(x_1) \times \mu^C(x_2) \times \mu^H(x_3) \times \mu^H(x_4) \vee \mu^H(x_1) \times \mu^H(x_2) \times \mu^C(x_3) \times \\ &\times \mu^H(x_4) = 1 \times 0 \times 0,48 \times 0,949 \vee 0,082 \times 0 \times 0,48 \times 0,48 \vee 0,091 \times 0 \times 0,48 \times \\ &\times 0,48 \vee 1 \times 0 \times 0,048 \times 0,723 \vee 1 \times 0 \times 0,48 \times 0,723 \vee 1 \times 0 \times 0,48 \times 0,48 = 0 \vee \\ &\vee 0 \vee 0 \vee 0 \vee 0 = 0. \end{aligned}$$

Логічне рівняння для групи показників Y_2 – робочий режим, що описує:

– високий терм:

$$\begin{aligned} \mu^6(Y_2) &= \mu^6(x_5) \times \mu^6(x_6) \times \mu^6(x_7) \vee \mu^C(x_5) \times \mu^6(x_6) \times \mu^6(x_7) \vee \mu^6(x_5) \times \\ &\times \mu^C(x_6) \times \mu^6(x_7) \vee \mu^6(x_5) \times \mu^6(x_6) \times \mu^C(x_7) \vee \mu^{6C}(x_5) \times \mu^6(x_6) \times \mu^6(x_7) \vee \\ &\vee \mu^6(x_5) \times \mu^{6C}(x_6) \times \mu^6(x_7) = 0,091 \times 0,958 \times 0,694 \vee 0,990 \times 0,958 \times 0,694 \vee \\ &\vee 0,091 \times 0,985 \times 0,694 \vee 0,091 \times 0,958 \times 0,484 \vee 0,099 \times 0,958 \times 0,694 \vee 0,091 \times \\ &\times 0,972 \times 0,694 = 0,091 \vee 0,694 \vee 0,091 \vee 0,091 \vee 0,099 \vee 0,091 = 0,694; \end{aligned}$$

– терм вище середнього:

$$\begin{aligned} \mu^{6C}(Y_2) &= \mu^C(x_5) \times \mu^{6C}(x_6) \times \mu^6(x_7) \vee \mu^6(x_5) \times \mu^{6C}(x_6) \times \mu^C(x_7) \vee \mu^6(x_5) \times \\ &\times \mu^C(x_6) \times \mu^{6C}(x_7) \vee \mu^{6C}(x_5) \times \mu^{6C}(x_6) \times \mu^{6C}(x_7) \vee \mu^{6C}(x_5) \times \mu^6(x_6) \times \mu^C(x_7) \vee \\ &\vee \mu^C(x_5) \times \mu^6(x_6) \times \mu^{6C}(x_7) = 0,990 \times 0,972 \times 0,694 \vee 0,091 \times 0,972 \times 0,484 \vee \\ &\vee 0,091 \times 0,985 \times 0,448 \vee 0,099 \times 0,972 \times 0,448 \vee 0,099 \times 0,985 \times 0,484 \vee 0,990 \times \\ &\times 0,958 \times 0,448 = 0,694 \vee 0,091 \vee 0,091 \vee 0,099 \vee 0,099 \vee 0,448 = 0,694; \end{aligned}$$

– середній терм:

$$\begin{aligned} \mu^c(Y_2) &= \mu^b(x_5) \times \mu^c(x_6) \times \mu^c(x_7) \vee \mu^c(x_5) \times \mu^{bc}(x_6) \times \mu^c(x_7) \vee \mu^c(x_5) \times \\ &\times \mu^c(x_6) \times \mu^{bc}(x_7) \vee \mu^h(x_5) \times \mu^c(x_6) \times \mu^b(x_7) \vee \mu^c(x_5) \times \mu^{bc}(x_6) \times \mu^c(x_7) \vee \\ &\vee \mu^c(x_5) \times \mu^{hc}(x_6) \times \mu^{bc}(x_7) = 0,091 \times 0,985 \times 0,484 \vee 0,990 \times 0,972 \times 0,484 \vee \\ &\vee 0,990 \times 0,985 \times 0,448 \vee 0,099 \times 0,985 \times 0,694 \vee 0,990 \times 0,972 \times 0,484 \vee \\ &\vee 0,990 \times 1 \times 0,448 = 0,091 \vee 0,484 \vee 0,448 \vee 0,099 \vee 0,484 \vee 0,448 = 0,484; \end{aligned}$$

– терм нижче середнього:

$$\begin{aligned} \mu^{hc}(Y_2) &= \mu^c(x_5) \times \mu^c(x_6) \times \mu^h(x_7) \vee \mu^c(x_5) \times \mu^h(x_6) \times \mu^c(x_7) \vee \mu^h(x_5) \times \\ &\times \mu^c(x_6) \times \mu^c(x_7) \vee \mu^c(x_5) \times \mu^{hc}(x_6) \times \mu^h(x_7) \vee \mu^h(x_5) \times \mu^{bc}(x_6) \times \mu^{hc}(x_7) \vee \\ &\vee \mu^{hc}(x_5) \times \mu^h(x_6) \times \mu^{bc}(x_7) = 0,990 \times 0,985 \times 1 \vee 0,990 \times 0,837 \times 0,484 \vee \\ &\vee 0,68 \times 0,985 \times 0,484 \vee 0,990 \times 1 \times 1 \vee 0,68 \times 0,972 \times 0,694 \vee 0,816 \times 0,837 \times \\ &\times 0,448 = 0,985 \vee 0,484 \vee 0,484 \vee 0,990 \vee 0,68 \vee 0,448 = 0,990; \end{aligned}$$

– низький терм:

$$\begin{aligned} \mu^h(Y_2) &= \mu^h(x_5) \times \mu^h(x_6) \times \mu^h(x_7) \vee \mu^c(x_5) \times \mu^h(x_6) \times \mu^h(x_7) \vee \mu^h(x_5) \times \\ &\times \mu^{hc}(x_6) \times \mu^h(x_7) \vee \mu^h(x_5) \times \mu^h(x_6) \times \mu^c(x_7) \vee \mu^h(x_5) \times \mu^c(x_6) \times \mu^h(x_7) \vee \\ &\vee \mu^h(x_5) \times \mu^h(x_6) \times \mu^{hc}(x_7) = 0,68 \times 0,837 \times 1 \vee 0,990 \times 0,837 \times 1 \vee 0,68 \times \\ &\times 1 \times 1 \vee 1 \times 0,837 \times 0,484 \vee 0,68 \times 0,985 \times 1 \vee 0,68 \times 0,837 \times 0,694 = 0,68 \vee \\ &\vee 0,837 \vee 0,68 \vee 0,484 \vee 0,68 \vee 0,68 = 0,837; \end{aligned}$$

Логічне рівняння для групи показників Y_3 – машина, що описує:

– високий терм:

$$\begin{aligned} \mu^b(Y_3) &= \mu^b(x_8) \times \mu^b(x_9) \vee \mu^{bc}(x_8) \times \mu^b(x_9) \vee \mu^b(x_8) \times \mu^c(x_9) \vee \mu^{bc}(x_8) \times \\ &\times \mu^c(x_9) \vee \mu^c(x_8) \times \mu^b(x_9) \vee \mu^b(x_8) \times \mu^c(x_9) = 0,585 \times 0,667 \vee 0,729 \times \\ &\times 0,667 \vee 0,585 \times 0,80 \vee 0,729 \times 0,80 \vee 1,012 \times 0,667 \vee 0,585 \times 0,80 = 0,585 \vee \\ &\vee 0,667 \vee 0,585 \vee 0,729 \vee 0,667 \vee 0,585 = 0,729; \end{aligned}$$

– терм вище середнього:

$$\begin{aligned} \mu^{bc}(Y_3) &= \mu^{bc}(x_8) \times \mu^b(x_9) \vee \mu^b(x_8) \times \mu^c(x_9) \vee \mu^{hc}(x_8) \times \mu^b(x_9) \vee \\ &\vee \mu^{bc}(x_8) \times \mu^c(x_9) \vee \mu^c(x_8) \times \mu^b(x_9) \vee \mu^h(x_8) \times \mu^b(x_9) = 0,729 \times 0,667 \vee \\ &\vee 0,585 \times 0,80 \vee 0,991 \times 0,667 \vee 0,729 \times 0,80 \vee 1,012 \times 0,667 \vee 0,935 \times \\ &\times 0,667 = 0,667 \vee 0,585 \vee 0,667 \vee 0,729 \vee 0,667 \vee 0,667 = 0,729; \end{aligned}$$

– середній терм:

$$\begin{aligned} \mu^C(Y_3) &= \mu^B(x_8) \times \mu^C(x_9) \vee \mu^{BC}(x_8) \times \mu^C(x_9) \vee \mu^C(x_8) \times \mu^C(x_9) \vee \mu^H(x_8) \times \\ &\times \mu^C(x_9) \vee \mu^{BC}(x_8) \times \mu^H(x_9) \vee \mu^{HC}(x_8) \times \mu^C(x_9) = 0,585 \times 0,80 \vee 0,729 \times 0,80 \vee \\ &\vee 1,012 \times 0,80 \vee 0,935 \times 0,80 \vee 0,729 \times 1 \vee 0,991 \times 0,80 = 0,585 \vee 0,729 \vee 0,80 \vee \\ &\vee 0,80 \vee 0,729 \vee 0,80 = 0,80; \end{aligned}$$

– терм нижче середнього:

$$\begin{aligned} \mu^{HC}(Y_3) &= \mu^{HC}(x_8) \times \mu^C(x_9) \vee \mu^C(x_8) \times \mu^H(x_9) \vee \mu^{BC}(x_8) \times \mu^H(x_9) \vee \mu^{HC}(x_8) \times \\ &\times \mu^H(x_9) \vee \mu^{BC}(x_8) \times \mu^C(x_9) \vee \mu^{HC}(x_8) \times \mu^C(x_9) = 0,991 \times 0,80 \vee 1,012 \times 1 \vee \\ &\vee 0,729 \times 1 \vee 0,991 \times 1 \vee 0,729 \times 0,80 \vee 0,991 \times 0,80 = 0,80 \vee 1 \vee 0,729 \vee 0,991 \vee \\ &\vee 0,729 \vee 0,80 = 1,0; \end{aligned}$$

– низький терм:

$$\begin{aligned} \mu^H(Y_3) &= \mu^H(x_8) \times \mu^H(x_9) \vee \mu^C(x_8) \times \mu^H(x_9) \vee \mu^{HC}(x_8) \times \mu^C(x_9) \vee \mu^{BC}(x_8) \times \\ &\times \mu^H(x_9) \vee \mu^H(x_8) \times \mu^H(x_9) \vee \mu^C(x_8) \times \mu^H(x_9) = 0,935 \times 1 \vee 1,012 \times 1 \vee 0,991 \times \\ &\times 0,80 \vee 0,729 \times 1 \vee 0,935 \times 1 \vee 1,012 \times 1 = 0,935 \vee 1 \vee 0,80 \vee 0,729 \vee 0,935 \vee 1 = 1; \end{aligned}$$

У цих багатопараметричних функціях знак « \vee » – логічна операція «АБО», а « \times » – логічна операція «І». Отже, при розрахунку остаточного результату з логічного запису усіх функцій належності, що об'єднані операцією «І» (\times), обирається мінімальне значення, а серед усіх функцій належності, що об'єднані операцією «АБО» (\vee), обирається максимальне значення [11].

Логічні рівняння для остаточної оцінки ефективного стану Z_j :

– високий терм:

$$\begin{aligned} \mu^B(Z) &= \mu^B(Y_1) \times \mu^B(Y_2) \times \mu^B(Y_3) \vee \mu^B(Y_1) \times \mu^B(Y_2) \times \mu^{BC}(Y_3) \vee \mu^{BC}(Y_1) \times \\ &\times \mu^B(Y_2) \times \mu^B(Y_3) \vee \mu^B(Y_1) \times \mu^{BC}(Y_2) \times \mu^B(Y_3) \vee \mu^B(Y_1) \times \mu^B(Y_2) \times \mu^C(Y_3) \vee \\ &\vee \mu^C(Y_1) \times \mu^B(Y_2) \times \mu^B(Y_3) = 0,082 \times 0,694 \times 0,729 \vee 0,082 \times 0,694 \times 0,729 \vee \\ &\vee 0,082 \times 0,694 \times 0,729 \vee 0,082 \times 0,694 \times 0,729 \vee 0,082 \times 0,694 \times 0,80 \vee 0,836 \times \\ &\times 0,694 \times 0,729 = 0,082 \vee 0,082 \vee 0,082 \vee 0,082 \vee 0,082 \vee 0,694 = 0,694; \end{aligned}$$

– терм вище середнього:

$$\begin{aligned} \mu^{6C}(Z) &= \mu^C(Y_1) \times \mu^{6C}(Y_2) \times \mu^6(Y_3) \vee \mu^6(Y_1) \times \mu^{6C}(Y_2) \times \mu^C(Y_3) \vee \mu^C(Y_1) \times \\ &\times \mu^6(Y_2) \times \mu^{6C}(Y_3) \vee \mu^{6C}(Y_1) \times \mu^C(Y_2) \times \mu^{6C}(Y_3) \vee \mu^{6C}(Y_1) \times \mu^{6C}(Y_2) \times \mu^C(Y_3) \vee \\ &\vee \mu^C(Y_1) \times \mu^6(Y_2) \times \mu^6(Y_3) = 0,836 \times 0,694 \times 0,729 \vee 0,082 \times 0,694 \times 0,80 \vee \\ &\vee 0,836 \times 0,694 \times 0,729 \vee 0,082 \times 0,484 \times 0,729 \vee 0,082 \times 0,694 \times 0,80 \vee 0,836 \times \\ &\times 0,694 \times 0,729 = 0,694 \vee 0,694 \vee 0,694 \vee 0,082 \vee 0,082 \vee 0,694 = 0,694; \end{aligned}$$

– середній терм:

$$\begin{aligned} \mu^C(Z) &= \mu^C(Y_1) \times \mu^C(Y_2) \times \mu^C(Y_3) \vee \mu^C(Y_1) \times \mu^{6C}(Y_2) \times \mu^C(Y_3) \vee \mu^C(Y_1) \times \mu^C(Y_2) \times \\ &\times \mu^{6C}(Y_3) \vee \mu^{6C}(Y_1) \times \mu^C(Y_2) \times \mu^C(Y_3) \vee \mu^C(Y_1) \times \mu^C(Y_2) \times \mu^6(Y_3) \vee \mu^6(Y_1) \times \\ &\times \mu^C(Y_2) \times \mu^C(Y_3) = 0,836 \times 0,484 \times 0,80 \vee 0,836 \times 0,694 \times 0,80 \vee 0,836 \times 0,484 \times \\ &\times 0,729 \vee 0,082 \times 0,484 \times 0,80 \vee 0,836 \times 0,484 \times 0,729 \vee 0,082 \times 0,484 \times 0,80 = \\ &= 0,484 \vee 0,694 \vee 0,484 \vee 0,082 \vee 0,484 \vee 0,082 = 0,694; \end{aligned}$$

– терм нижче середнього:

$$\begin{aligned} \mu^{HC}(Z) &= \mu^C(Y_1) \times \mu^C(Y_2) \times \mu^H(Y_3) \vee \mu^C(Y_1) \times \mu^H(Y_2) \times \mu^C(Y_3) \vee \mu^H(Y_1) \times \mu^C(Y_2) \times \\ &\times \mu^C(Y_3) \vee \mu^C(Y_1) \times \mu^{HC}(Y_2) \times \mu^H(Y_3) \vee \mu^H(Y_1) \times \mu^{6C}(Y_2) \times \mu^{HC}(Y_3) \vee \mu^{HC}(Y_1) \times \\ &\times \mu^H(Y_2) \times \mu^{6C}(Y_3) = 0,836 \times 0,484 \times 1 \vee 0,836 \times 0,837 \times 0,80 \vee 0 \times 0,484 \times 0,80 \vee \\ &\vee 0,836 \times 0,990 \times 1 \vee 0 \times 0,694 \times 1 \vee 0 \times 0,837 \times 0,729 = 0,484 \vee 0,80 \vee 0 \vee 0,836 \vee \\ &\vee 0 \vee 0 = 0,836; \end{aligned}$$

– низький терм:

$$\begin{aligned} \mu^H(Z) &= \mu^H(Y_1) \times \mu^H(Y_2) \times \mu^H(Y_3) \vee \mu^C(Y_1) \times \mu^H(Y_2) \times \mu^H(Y_3) \vee \mu^H(Y_1) \times \mu^{HC}(Y_2) \times \\ &\times \mu^H(Y_3) \vee \mu^H(Y_1) \times \mu^H(Y_2) \times \mu^C(Y_3) \vee \mu^H(Y_1) \times \mu^C(Y_2) \times \mu^H(Y_3) \vee \mu^{HC}(Y_1) \times \\ &\times \mu^H(Y_2) \times \mu^H(Y_3) = 0 \times 0,837 \times 1 \vee 0,836 \times 0,837 \times 1 \vee 0 \times 0,990 \times 1 \vee 0 \times 0,837 \times \\ &\times 0,80 \vee 0 \times 0,484 \times 1 \vee 0 \times 0,837 \times 1 = 0 \vee 0,836 \vee 0 \vee 0 \vee 0 \vee 0 = 0,836. \end{aligned}$$

Для врахування різних ступенів значимості параметрів x_1, \dots, x_9 , визначених експертами, введено вагові коефіцієнти параметрів $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, де n – кількість параметрів.

Для отримання більш точної оцінки ефективності процесу формування заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом піднесено функції належності $\mu(x_i)$ до степеня α_i :

$$\mu^{Z_j}(x_i) = \mu^{Z_j}(x_i)^{\alpha_j}; \quad j = \overline{1, \dots, J} \quad (J = 5); \quad i = \overline{1, \dots, n} \quad (n = 9), \quad (3.28)$$

де $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$. Із врахуванням рівності компетенцій експертів прийма-

ємо $\alpha_i=1$. Зауважимо, що можна приймати різні значення степеня α_i , в залежності від рівня компетентості експертів.

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

$$\mu^{Z_j} = \max \left\{ \mu^{Z_1}, \mu^{Z_2}, \mu^{Z_3}, \mu^{Z_4}, \mu^{Z_5} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,694; 0,694; 0,694; \\ 0,836; 0,836 \end{array} \right\} = 0,836.$$

Так як значення функції належності $\mu^{Z_j}=0,836$ і воно входить в діапазон значень рішень $Z_I=[1,0; 0,80)$, відповідно приймаємо рішення про «відмінний» стан функціонування при заданих параметрах (табл. 3.2) роботи даної технологічної системи віброударного пресування заготовок з порошкових матеріалів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ВІБРОПРЕСОВОМУ ОБЛАДНАННІ З ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ

4.1 Параметри експериментальних зразків заготовок для віброударного пресування

Технологічний комплекс віброударного пресування складається з трьох систем, які характеризуються певними параметрами. Параметри кожної системи взаємопов'язані між собою. Для експериментальної оцінки методу формоутворення необхідно вибрати критерій оцінювання ефективності всього технологічного процесу. Головним критерієм оцінювання методу формоутворення є якість заготовки. Саме якість заготовки виробу повинна забезпечуватись відповідними показниками, як міцність, щільність та рівнощільність поусьому об'єму в умовах безвідходного виробництва, усуваючи подальшу механічну обробку для того, щоб задану заготовку можна було транспортувати до камери спікання без втрати її форми. Саме якість заготовки залежить від ефективності робочого процесу (формоутворення) та ефективності роботи машини (вібропресового обладнання) [75].

На основі аналізу результатів досліджень, які виконувалися на вібропресі ІВПМ-5Л було встановлено закономірності впливу параметрів основних режимів ВУП заготовок виробів з порошкових матеріалів на досягнення розрахункових значень середньої щільності ρ_{cp} та відносної нерівнощільності ε_{ρ} заготовок після завершення процесу їхнього формоутворення. Значення ρ_{cp} та ε_{ρ} визначалися за допомогою виразів:

$$\rho_{cp} = \frac{m_{заг}}{W_{заг}}; \quad \varepsilon_{\rho} = \frac{|\rho_i - \rho_{cp}|}{\rho_{cp}} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

де $m_{заг}$ – маса навішування порошкового матеріалу; $W_{заг}$ – об'єм заготовки після завершення її формоутворення; ρ_i – середня щільність виділеного об'єму W_i заготовки масою m_i . За відомими аналітичними залежностями розраховувався об'єм заготовок правильної геометричної форми [106]. Для визначення лінійних розмірів використовувався

штангенциркуль і мікромметр. Методом гідростатичного зважування встановлювався об'єм виділених (розрізаних) частин заготовок [66].

Для визначення маси використовувалися лабораторні ваги з набором важків. Мінімальне число вимірювань бралось рівним трьом для забезпечення вірогідності результатів 0,9...0,95 [75].

Оцінка придатності заготовок, отриманих ВУП, проводилось порівнянням розрахункових величин ρ_{cp} та ε_p з їхніми допустимими значеннями $\rho_{cp} \geq \rho_{cp}$ і $\varepsilon_p \leq \varepsilon_p$, що дозволяє опосередковано охарактеризувати механічну міцність заготовок і рівномірність розподілення в них внутрішніх напруг. При проведенні попередніх технологічних експериментів оцінювання придатності заготовок проводилася також візуалізація наявності на їхніх поверхнях ділянок пере- і недопресовувань у вигляді тріщин і механічних руйнувань ділянок тіла заготовок після витягання їх з контейнера прес-форми [69].

З досліджень визначили, що параметри заготовки ρ_{cp} та ε_p залежать від величини енергії E_a , накопиченої в одноцикловому гідроаккумуляторі для здійснення робочого ходу ІВПМ та енергії $E_{повн}$, яка витрачається на весь процес формоутворення.

Під час експериментальних досліджень були використані заготовки виробів «еталонних зразків» з порошкових матеріалів. «Еталонний зразок» – маса якого дорівнювала 110 гр – засипався в циліндричний контейнер діаметром 55 мм прес-форми закритого типу. Порошкові матеріали брались чотирьох типів М1, М2, М3, М4. М1 – мінеральний порошок НЕФ (вологістю 13%, зв'язка жирова 3,2%); М2 – мінеральний порошок НЕФ (вологість 2%, зв'язка відсутня); М3 – карбід кремнію зел. № 4, 10, 12, М28 – 80% (бакеліт 10%, кокс 10%); М4 – вогнетривкий шамот (вологість 13,8%, зв'язка глиняна 31,2%).

4.2 Експериментальна установка ІВПМ для дослідження віброударного пресування

В загальному вигляді схема для дослідження процесу формоутворення (рис. 4.1) з використанням ЕОМ містить ІВПМ як область досліджень (ОД), комплект вимірювальних перетворювачів, аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП) [31, 60]. Введення даних, реєстрація і спостереження за ходом випробування проходять за допомогою клавіатури, графічного дисплею.

Для здійснення нижче вказаних процедур:

1. Формування вхідних даних:

- розрахунок робочих навантажень;
- розрахунок законів розподілу;
- формування комбінацій значень досліджуваних параметрів;
- керування експериментом.

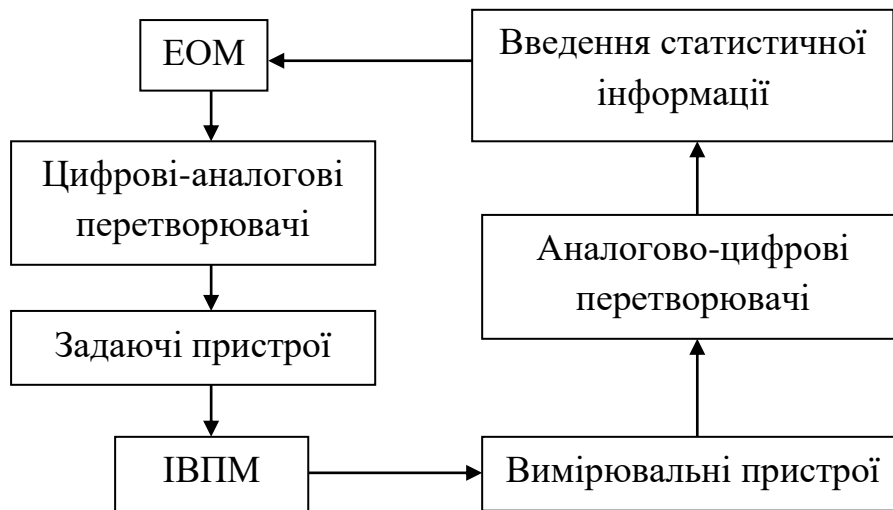


Рис. 4.1. Структурна схема обробки вхідної інформації за допомогою ЕОМ

2. Обробка результатів випробувань:

- розрахунок регламентованих параметрів;
- статистична обробка результатів N випробувань;
- розрахунок функцій та законів розподілу вихідних параметрів;
- оцінювання ефективності прийняття рішення.

3. Прогнозування втрат ефективності при виникненні несправностей:

- визначення закономірностей зносу та експлуатаційних факторів.

4. Розрахунок надійності:

- оцінювання параметрів областей робочих станів ІВПМ;
- розрахунок дієздатності для кожного з параметрів ІВПМ;
- оцінювання основних факторів, які впливають на якість, ефективність та надійність ІВПМ.

5. Оптимізація параметрів ІВПМ:

- оптимізація технологічних допусків на геометричні параметри деталей ІВПМ;
- оптимізація режимів ВУП;

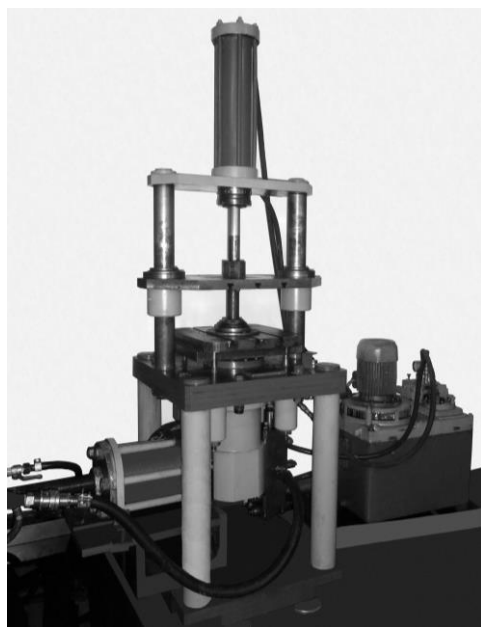
– оцінювання ефективності підвищення стійкості механізмів ІВПМ;

– розробка прикладних програм повного циклу проведення процедури прийняття рішення при дослідженні ВУП на ІВПМ.

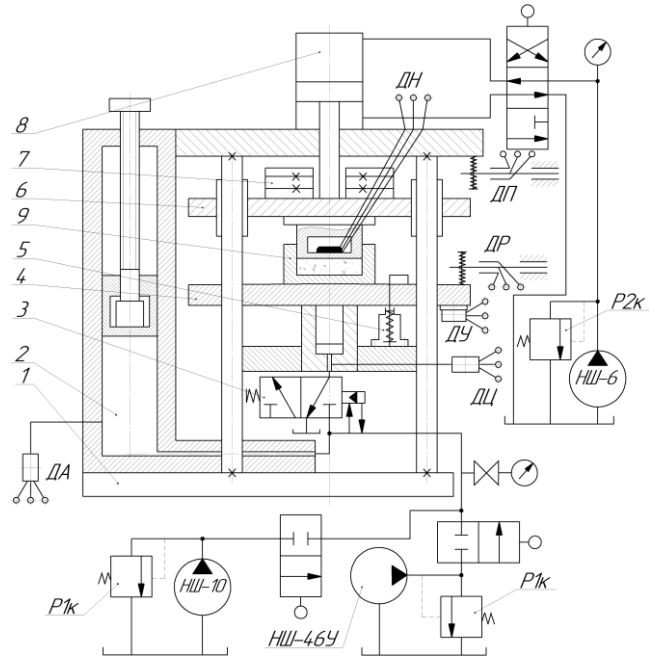
Формування і дослідження вхідних даних, що охоплює створення банку вхідної інформації, розрахунок законів розподілу варіації параметрів і вибір їхніх значень для формування дослідження, оцінка ефективності прийняття рішення є одними з основних етапів.

Основним джерелом інформації для розрахунку і проведення тих або інших дій на ІВПМ служить технологічний процес [30].

Дослідження були проведені на вібропресі ІВПМ-5Л (рис. 4.2). Даний вібропрес оснащений: універсальним гідроімпульсним приводом з двокаскадним триходовим двопозиційним вібробуджувачем 3, який приєднаний схемою «на вході» (рис. 2.2), станиною 1; гідроаккумулятор з регульованим об'ємом 2; вібробуджувачем 3; робочим столом 4; пружинами пружного повернення 5; рухомою поперечиною 6; змінним інерційними вантажами 7; гідроциліндрами статичного притискання 8; прес-формою 9; датчиками тиску ДА і ДЦ; датчиками переміщень ДР і ДП; датчиками зусилля ДЗ; датчиком прискорень ДП.



а)



б)

Рис. 4.2. Експериментальна установка вібропреса ІВПМ-5Л:

а – загальний вигляд; б – конструктивна схема та принципи схеми розподілення робочої рідини при підключенні вібробуджувача «на вході»

Вузол пружного повернення робочої ланки ІВПМ-5Л виконаний у вигляді механічних пружин стискання, а додаткове статичне притискання рухомої поперечини до заготовки забезпечує гідроциліндр з незалежним допоміжним насосним приводом [69].

Для зміни параметрів навантаження на вібропресі ІВПМ-5Л передбачено: східчасту зміну подачі робочої рідини в ГПП відповідно від насосів НШ-10 ($0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) та НШ-46У ($10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$); статичне притискання пуансона до заготовки штоком гідроциліндра 8, що приводиться в рух від насоса допоміжного приводу НШ-6 ($0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) при плавному регулюванні тиску налаштування спрацьовування запобіжного клапана $p_{2к}$ в межах від 0 до 2,5 МПа; використання змінних інерційних вантажів 7 (по 5 кг та 10 кг) загальною масою до 80 кг; плавне регулювання тиску p_1 налаштування спрацьовування вібробуджувача 3 в межах від 5 до 15 МПа під час налаштування запобіжного клапана на тиск $p_{1к}=16$ МПа; зміну об'єму порожнини гідроаккумулятора 2 в межах від 10^{-3} до $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Регулювання енергії одноциклового гідроаккумулятора E_a і вибір режиму ВУП на ІВПМ-5Л з вібробуджувачем здійснювалися зміною співвідношень параметрів ГПП: об'єму гідроаккумулятора W_a ($0,0012 \text{ м}^3$; $0,00152 \text{ м}^3$; $0,002 \text{ м}^3$); тиску налаштування спрацьовування вібробуджувача p_2 (8 МПа; 10 МПа; 11 МПа); подачі насоса Q_a ($0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ – НШ10; $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ – НШ46У). Маса інерційного вантажу m вибиралась з умови створення на поверхні заготовки питомого зусилля $p=0,1 \dots 0,15$ МПа, а додаткове статичне притискання забезпечувало можливість його збільшення до 1 МПа. Величина енергії одноциклового гідроаккумулятора E_a для кожного випадку визначалась розрахунковим шляхом за допомогою виразу $E_a = (p_{\max}^2 W_0) / 2K_{np}$. Значення K_{np} бралось постійним ($K_{np}=1,41 \cdot 10^9 \text{ Па}$) [89]. Для певних співвідношень параметрів приводу, які забезпечують енергії $E_{a1} = 34,2 \text{ Дж}$ ($W_{a1}=1,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $p_1=8 \text{ МПа}$; $f=13,6 \text{ Гц}$), $E_{a2}=48,2 \text{ Дж}$ ($W_{a2} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $p_1=10 \text{ МПа}$; $f=11,8 \text{ Гц}$), $E_{a3} = 53,1 \text{ Дж}$ ($W_{a3}=1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $p_1=10 \text{ МПа}$, $f=11,1 \text{ Гц}$) і $E_{a4}=85,8 \text{ Дж}$ ($W_{a4}=2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $p_1=11 \text{ МПа}$; $f=8,2 \text{ Гц}$), на ІВПМ-5Л реалізовувалися основні режими ВУП, а саме режими: ВУП-I – $p=0,12 \text{ МПа}$; ВУП-II – $p=0,15 \text{ МПа}$; ВУП-III – $p=0,13 \text{ МПа}$.

Шляхом регулювання величини енергії одноциклового гідроаккумулятора E_a , у межах конкретного режиму ВУП, можна забезпечити

зменшення або збільшення середньої щільності «еталонного» зразка з будь-якого вказаного порошкового матеріалу від недопресовування або до перепресовування.

На основі проведених експериментальних досліджень пресування чотирьох типів заготовок «еталонних» зразків з різних матеріалів на ІВПМ-5Л було отримано числову базу даних якісних характеристик досліджуваного процесу (табл. 4.1, 4.2).

Таблиця 4.1

**Результати експериментальних досліджень заготовок на ІВПМ
(M1, M2 – ВУП – I, II, III)**

| M1 (мінеральний порошок НЕФ; вологість 13%; зв'язка жирова 3,2%) | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|---------------------------|------|------|------|----------------------------|------|------|------|-----------------------------|------|------|------|
| | <i>t, c</i> | <i>p=0,12</i> МПа (ВУП-I) | | | | <i>p=0,15</i> МПа (ВУП-II) | | | | <i>p=0,13</i> МПа (ВУП-III) | | | |
| <i>E_a, Дж</i> | / | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 |
| <i>f, Гц</i> | | 13,6 | 11,8 | 11,1 | 8,2 | 21,6 | 17,2 | 16,0 | 14,3 | 25,1 | 22,2 | 21,5 | 17,3 |
| <i>ρ_{ср.}, Г/см³</i> | 3 | 2,13 | 2,3 | 2,3 | 2,49 | 2,2 | 2,38 | 2,35 | 2,48 | 2,11 | 2,41 | 2,38 | 2,58 |
| <i>ε_p, %</i> | | 2,1 | 4,0 | 3,9 | 8,2 | 2,3 | 5,2 | 4,9 | 7,8 | 3,8 | 6,7 | 4,7 | 11,0 |
| <i>ρ_{ср.}, Г/см³</i> | 4 | 2,22 | 2,35 | 2,38 | 2,58 | 2,19 | 2,45 | 2,51 | 2,71 | 2,08 | 2,63 | 2,51 | 2,63 |
| <i>ε_p, %</i> | | 2,2 | 5,4 | 5,3 | 7,9 | 3,8 | 4,7 | 5,0 | 8,0 | 2,9 | 5,9 | 1,0 | 13,0 |
| <i>ρ_{ср.}, Г/см³</i> | 5 | 2,35 | 2,32 | 2,4 | 2,6 | 2,27 | 2,44 | 2,49 | 2,67 | 2,16 | 2,6 | 2,6 | 2,57 |
| <i>ε_p, %</i> | | 2,2 | 7,2 | 8,1 | 9,3 | 3,6 | 4,8 | 5,2 | 1,0 | 4,0 | 8,1 | 6,5 | 1,0 |
| <i>ρ_{ср.}, Г/см³</i> | 7 | 2,3 | 2,25 | 2,29 | 2,48 | 2,33 | 2,38 | 2,4 | 2,83 | 2,21 | 2,63 | 2,5 | 2,55 |
| <i>ε_p, %</i> | | 5,1 | 9,3 | 8,8 | 10,2 | 5,2 | 5,1 | 6,0 | 1,0 | 6,1 | 8,9 | 1,0 | 2,0 |
| M2 (мінеральний порошок НЕФ; вологість 2%; зв'язка відсутня) | | | | | | | | | | | | | |
| <i>E_a, Дж</i> | / | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 |
| <i>f, Гц</i> | | 13,6 | 11,8 | 11,1 | 8,2 | 21,6 | 17,2 | 16,6 | 14,3 | 25,1 | 22,2 | 21,5 | 17,3 |
| <i>ρ_{ср.}, Г/см³</i> | 3 | 1,7 | 2,1 | 2,1 | 2,2 | 1,8 | 1,78 | 1,76 | 1,98 | 2,13 | 2,29 | 2,25 | 2,41 |
| <i>ε_p, %</i> | | 3,2 | 2,5 | 2,8 | 2,9 | 1,0 | 4,9 | 5,1 | 10 | 3,9 | 6,1 | 5,1 | 1,0 |
| <i>ρ_{ср.}, Г/см³</i> | 4 | 1,85 | 2,12 | 2,15 | 2,29 | 1,79 | 2,1 | 2,04 | 2,21 | 2,13 | 2,28 | 2,25 | 2,38 |
| <i>ε_p, %</i> | | 4,1 | 2,9 | 3,4 | 3,4 | 3,8 | 6,8 | 5,3 | 9,7 | 3,6 | 6,0 | 4,8 | 6,9 |
| <i>ρ_{ср.}, Г/см³</i> | 5 | 1,81 | 2,21 | 2,2 | 2,3 | 1,83 | 2,1 | 2,16 | 2,3 | 2,16 | 2,35 | 2,31 | 2,43 |
| <i>ε_p, %</i> | | 3,8 | 8,2 | 7,6 | 7,7 | 4,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 3,6 | 3,9 | 4,0 | 7,0 |
| <i>ρ_{ср.}, Г/см³</i> | 7 | 1,78 | 2,16 | 2,23 | 2,26 | 1,8 | 2,22 | 2,15 | 2,3 | 2,21 | 2,33 | 2,3 | 2,37 |
| <i>ε_p, %</i> | | 7,8 | 7,9 | 8 | 8,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 10,8 | 4,0 | 3,9 | 4,3 | 1,0 |

Результати експериментальних досліджень порошкових матеріалів М3 та М4 представленні у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

**Результати експериментальних досліджень заготовок на ІВПМ
(М3, М4 – ВУП – I, II, III)**

| М3 (карбід кремнію зелений №4, №10, №12, М28-80%; бакеліт рідкий-10%; кокс нафтовий-10%) | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|----------------------------|------|------|------|-----------------------------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|
| | <i>t</i> , с | <i>p</i> =0,12 МПа (ВУП-I) | | | | <i>p</i> =0,15 МПа (ВУП-II) | | | | <i>p</i> =0,13 МПа (ВУП-III) | | | |
| E_a , Дж | / | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 |
| <i>f</i> , Гц | | 13,6 | 11,8 | 11,1 | 8,2 | 21,6 | 17,2 | 16,6 | 14,3 | 25,1 | 22,2 | 21,5 | 17,3 |
| $\rho_{ср.}$, г/см ³ | 3 | 1,9 | 2,1 | 2,06 | 2,16 | 2,4 | 2,16 | 2,12 | 2,23 | 1,78 | 1,93 | 1,95 | 2,06 |
| ϵ_r , % | | 3,2 | 8,2 | 7,9 | 10,0 | 7,2 | 8,3 | 7,9 | 1,0 | 4,2 | 5,8 | 5,8 | 9,5 |
| $\rho_{ср.}$, г/см ³ | 4 | 1,93 | 2,08 | 2,05 | 2,22 | 2,04 | 2,15 | 2,1 | 2,25 | 1,8 | 1,88 | 1,91 | 2,03 |
| ϵ_r , % | | 2,8 | 6,9 | 7,0 | 10,0 | 6,7 | 8 | 7,9 | 1,0 | 4,0 | 5,7 | 5,8 | 9,1 |
| $\rho_{ср.}$, г/см ³ | 5 | 2,0 | 2,01 | 2,05 | 2,2 | 2,05 | 2,15 | 2,15 | 2,20 | 1,79 | 1,88 | 2,0 | 2,13 |
| ϵ_r , % | | 3,0 | 6,9 | 6,5 | 10,0 | 8,0 | 8,0 | 8,4 | 1,0 | 3,9 | 5,8 | 6,0 | 8,7 |
| $\rho_{ср.}$, г/см ³ | 7 | 2,0 | 1,99 | 2,1 | 2,22 | 2,0 | 2,2 | 2,19 | 2,28 | 1,79 | 2,04 | 2,05 | 2,16 |
| ϵ_r , % | | 5,2 | 8,1 | 10 | 12 | 7,9 | 1,0 | 9,1 | 1,0 | 4,3 | 6,3 | 6,7 | 1,0 |
| М4 (вогнетривкий шамот; вологість 13,8%; зв'язка цегляна 31,2%) | | | | | | | | | | | | | |
| E_a , Дж | / | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 | 34,2 | 48,2 | 53,1 | 85,8 |
| <i>f</i> , Гц | | 13,6 | 11,8 | 11,1 | 8,2 | 21,6 | 17,2 | 16,6 | 14,3 | 25,1 | 22,2 | 21,5 | 17,3 |
| $\rho_{ср.}$, г/см ³ | 3 | 2,3 | 2,45 | 2,41 | 2,6 | 2,39 | 2,55 | 2,5 | 2,71 | 2,19 | 2,4 | 3,39 | 2,43 |
| ϵ_r , % | | 2,9 | 4,1 | 3,8 | 3,2 | 4,1 | 4,0 | 4,7 | 5,0 | 1,0 | 4,3 | 3,9 | 6,1 |
| $\rho_{ср.}$, г/см ³ | 4 | 2,29 | 2,49 | 2,43 | 2,6 | 2,45 | 2,56 | 2,56 | 2,8 | 2,31 | 2,46 | 2,47 | 2,55 |
| ϵ_r , % | | 3,1 | 3,0 | 2,8 | 3,3 | 3,9 | 5,1 | 4,0 | 5,4 | 5,3 | 11,0 | 9,6 | 1,0 |
| $\rho_{ср.}$, г/см ³ | 5 | 2,3 | 2,46 | 2,5 | 2,55 | 2,43 | 2,6 | 2,58 | 2,93 | 2,27 | 2,51 | 2,47 | 2,52 |
| ϵ_r , % | | 3,8 | 2,9 | 3,1 | 4,0 | 4,2 | 4,9 | 4,7 | 5,3 | 5,6 | 10,0 | 10,0 | 12,0 |
| $\rho_{ср.}$, г/см ³ | 7 | 2,35 | 2,51 | 2,49 | 2,61 | 2,48 | 2,6 | 2,63 | 2,87 | 2,33 | 2,57 | 2,63 | 2,65 |
| ϵ_r , % | | 4,3 | 5,0 | 5,0 | 5,4 | 4,1 | 4,9 | 5,5 | 6,0 | 4,2 | 1,0 | 1,0 | 12,0 |

Тривалість процесу ВУП *t* встановлювалася 3 с, 4 с, 5 с і 7 с. Ефективність кожного з режимів, у залежності від тривалості навантаження, оцінювалася за результатами вимірювань середньої щільності $\rho_{ср}$ та відносної нерівнощільності ϵ_r трьох «еталонних» зразків даного

порошкового матеріалу, а також знаходження їх середньоарифметичних значень. Середня щільність зразків визначалася безпосередньо після їх витягування з прес-форми. Для визначення відносної нерівнощільності кожен «еталонний» зразок, попередньо витриманий у сушильній шафі при температурі 100 °С протягом 16...18 годин, знову піддавався вимірюванню середньої щільності, а потім розділявся на три приблизно рівні за висотою частини. Об'єм даних частин визначався гідростатичним зважуванням. При розрахунку відносної нерівнощільності вибиралося максимальне значення $|\rho_i - \rho_{cp}|$ абсолютного відхилення середньої щільності висушеного зразка [75].

Для постійної величини енергії одноциклового гідроакумулятора E_a , збільшення тривалості процесу ВУП дозволяє збільшувати середню щільність «еталонного» зразка тільки до визначеної межі, вище якої середня щільність зразка практично залишається незмінною, а якість помітно знижується в результаті перепресовування і руйнування.

4.3 Аналіз і обробка результатів експериментальних даних

4.3.1 Теоретичні основи обробки і аналізу статистичних даних.

Аналітичну оцінку отриманих експериментальних даних проводимо в статистичному середовищі STATISTICA 10.0. Під час отримання результатів експериментальних досліджень виникає потреба у перевірці достовірності цих результатів, а також адекватності теоретичних висновків і залежностей.

Достовірність результатів експериментальних досліджень оцінюємо за вірогідною ймовірністю P_n (надійністю) або ймовірністю того, що дійсне значення ймовірності величини потрапляє у вірогідний інтервал:

$$m = \pm t_{\beta} \sigma_m \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{N-1}}, \quad (4.1)$$

де t_{β} – гарантійний коефіцієнт Ст'юдента для довірчої вірогідності; σ_m – середньоквадратичне відхилення (дисперсія) вимірів:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{N-1}}, \quad (4.2)$$

де N – кількість вимірів; x_i – значення вимірюваної величини; \bar{x} – середньоарифметичне значення вимірюваної величини:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (4.3)$$

Щоб отримати вірогідне значення вимірюваних величин, необхідну кількість вимірів під час розподілу похибок, близького до нормального, визначаємо за формулою:

$$N \geq \frac{1 + P_H + 2n_{cm}}{1 - P_H} , \quad (4.4)$$

де n_{cm} – число вимірів із грубими похибками, які відкидали.

Відповідно до рекомендацій, вірогідна ймовірність вибрана в інтервалі (0,8...0,9), тоді при $n_{cm}=0$ маємо:

$$N \geq \frac{1 + (0,8...0,9)}{1 - (0,8...0,9)} . \quad (4.5)$$

У подальшому за N відомих вимірів визначається ймовірність P_H за умови, що похибка середнього значення не виходить за межі вірогідного інтервалу m . Для цього вираховуємо середньоарифметичне значення σ_0 середньоквадратичного відхилення σ_m :

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_m}{N} , \quad (4.6)$$

Потім визначається коефіцієнт Ст'юдента:

$$\alpha_{cm} = \frac{\mu}{\sigma_0} . \quad (4.7)$$

Після чого, за відомими α_{cm} та N , визначаємо розрахункову вірогідну ймовірність P_{nl} . Якщо P_{nl} виявляється нижчою за необхідну, то визначаємо мінімальну кількість вимірів:

$$N_{\min} = \frac{k_B^2 t_\beta^2}{\Delta^2} , \quad (4.8)$$

де Δ – точність вимірів; k_B – коефіцієнт варіацій, що дорівнює:

$$k_B = \frac{\sigma_m}{\bar{x}} . \quad (4.9)$$

Перевірку адекватності теоретичних залежностей проводимо за допомогою відхилень, що вираховуються за теоретичними залежно-

стями значень шуканого параметра у від експериментально встановлених та усереднених \bar{y} за числом повторень дослідів m .

Оцінку відхилень проводимо із використанням теорії Фішера, для чого розраховуємо екстремальне значення критерію Фішера f_e і порівнюємо з теоретичним f_m , яке приймається за необхідного рівня значущості. Якщо $f_e \leq f_m$, тоді теоретична залежність адекватна.

Значення критерію Фішера для експериментальних вимірів визначаємо за залежністю:

$$f_e = \frac{S_a}{S_b}, \quad (4.10)$$

де $S_a = \frac{m}{n-1} \sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y})^2$ – дисперсія адекватності, де m – кількість

паралельних дослідів; $S_b = \frac{l}{N(m-l)} \sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \hat{y})^2$ – дисперсія відтворюваності, l – кількість значущих коефіцієнтів теоретичної залежності.

Теоретичне значення критерію Фішера приймаємо за таблицею при відповідних ступенях вільності f_1 і f_2 та рівні значущості q (зазвичай $q=0,05$), тоді:

$$f_1 = N - 1; \quad f_2 = N(m - 1). \quad (4.11)$$

Якщо теоретичні розрахунки виявляться неадекватними, порівняно з даними експериментів, то необхідно переходити до більш складних, досліджуючи раніше прийняті під час складання теоретичних припущень.

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювався за формулами:

$$S(b) = T_i \bar{s}_y(\bar{y}); \quad \Delta b_{кр} = tS(b), \quad (4.12)$$

де $S(b)$ – помилка у визначенні відповідного коефіцієнта; T_i – розрахункові коефіцієнти для планів Бокса–Бенкіна.

Перевірка моделей на адекватність здійснювалась за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{на}^2}{S_E^2}, \quad (4.13)$$

де s_{na}^2 – дисперсія неадекватності; $S_{na}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{13} y_i^2 - \sum \left[b \cdot \sum y_s x_i x_j \right]}{f_{na}}$.

Перевірку однорідності дисперсій здійснюємо за допомогою критерію Кохрена:

$$G = \frac{(S_i^2)_i}{\sum_{i=1}^N S_i^2}. \quad (4.14)$$

Якщо $G < G_{табл}$ за заданою величиною помилки і числом ступенів свободи $f_1 = n - 1$ і $f_2 = N$, гіпотеза про однорідність ряду дисперсій може бути прийнята. При однорідності дисперсій розраховується оцінка усередненої дисперсії відтворюваності:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{S}_i^2}{N(n-1)}.$$

Також під час обробки експериментальних даних використовуємо методи графічного зображення, які дають найбільш наочне уявлення про результати експерименту, дозволяють краще зрозуміти фізичну сутність досліджуваного процесу, виявити загальний характер функціональної залежності досліджуваних змінних величин, встановити наявність екстремумів функції. При цьому отримані точки на графіку з'єднуємо плавною лінією так, щоб вона, за змогою проходила щонайближче до всіх екстремальних точок, оскільки більшість функцій має плавний характер.

4.3.2 Результати експериментальних досліджень. На основі результатів експериментальних досліджень порошкових матеріалів М1, М2, М3 та М4 в програмі Statistica 10.1 будують діаграми зміни середньої щільності заготовки в залежності від режиму ВУП (рис. 4.2), де для кожного типу порошкового матеріалу визначаємо найефективніший його основний режим (на рисунку 4.2 виділено поверхнею). Для М1 і М2 – ВУП-I; для М3 – ВУП-III; для М4 – ВУП-II, а для конкретного зразка з заданого матеріалу – найбільш раціональне співвідношення величин енергій $[E_a]$ та $[E_{повн}]$, при яких він досягає максимальної середньої щільності в разі мінімальної відносної нерівнощільності

за об'ємом і відсутності на його поверхні ознак пере- і недопресовувань.

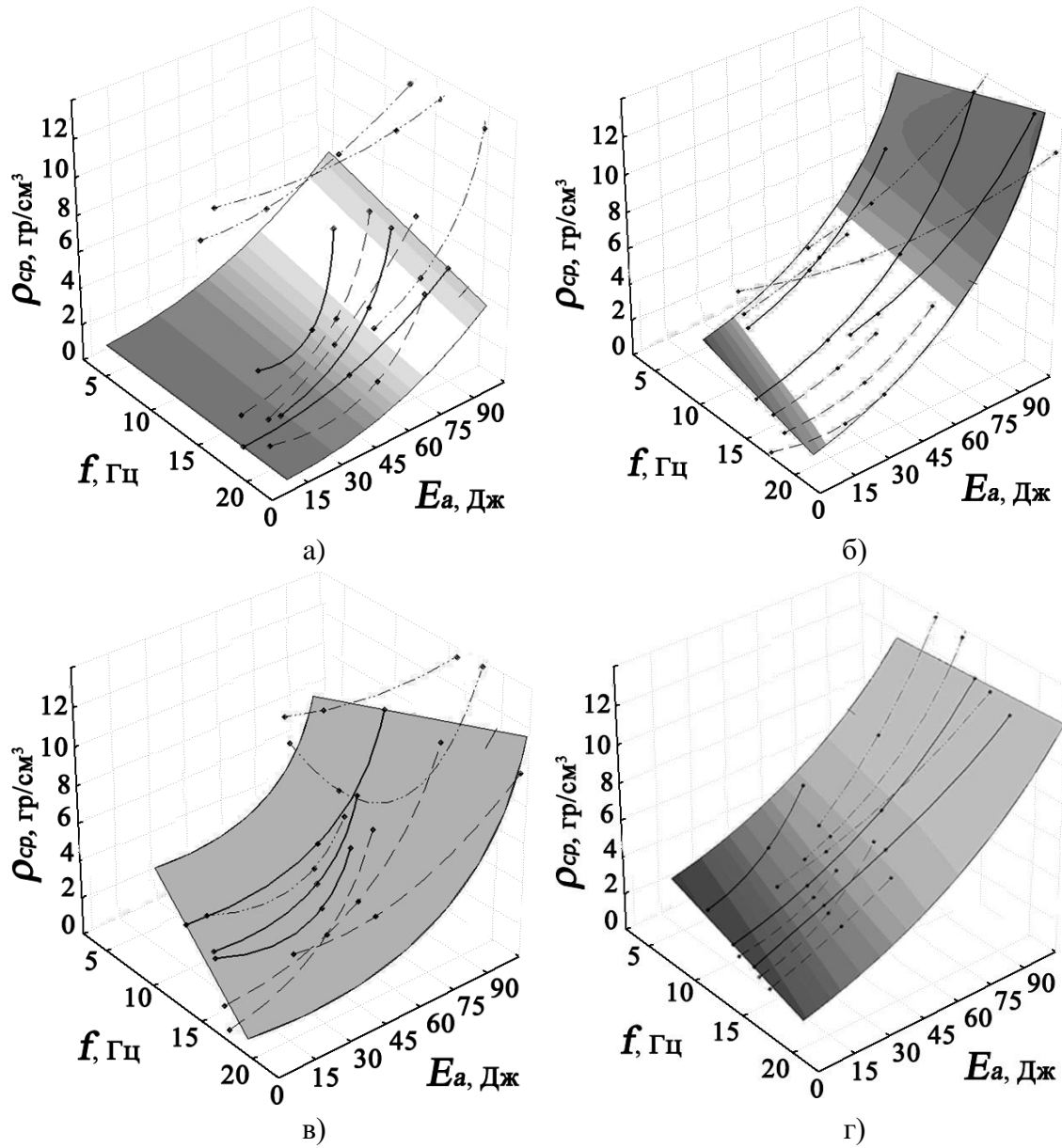


Рис. 4.2. Діаграми зміни середньої щільності заготовки в залежності від режиму віброударного пресування:

а – матеріал М1; б – матеріал М2; в – матеріал М3; г – матеріал М4

Виходячи з фізико-механічних характеристик кожного порошкового матеріалу можна обґрунтувати вибір режиму ВУП. У розглянутих випадках режими ВУП-I і ВУП-II, що забезпечують повне розвантаження заготовки, бажано застосовувати для формоутворення порошкових матеріалів із пластифікатором та зв'язкою, а режим ВУП-III – для сухих порошкових матеріалів.

Наведені рекомендації можна обґрунтувати з позиції резонансно-структурної теорії процесів ВУП порошкових матеріалів: під час повернення контейнера прес-форми з заготовкою із сухого порошкового матеріалу у вихідне положення відбувається зіткнення столу зі станиною після чого у заготовці поширюється ударна хвиля стиску, яка переходить в хвилю розтягу (верхній кінець заготовки розвантажений); енергія ударної хвилі концентрується в зонах контактів частинок основи і при недостатніх силах зчеплення викликає їх руйнування, що супроводжується розпушенням заготовки; додаткове статичне притискання рухомої поперечини з інерційним вантажем до заготовки (режим ВУП-III) створює в останній полі напруг стиску, яке компенсує можливе руйнування (розпушення) структури скелета заготовки. Режими ВУП-I і ВУП-II близькі між собою і тому мають приблизно рівні технологічні можливості, але з точки зору ефективності реалізації даних режимів на ІВПМ, перевагу варто віддати режиму ВУП-I, як стійкішому, що допускає здійснення регулювання в певних межах параметрів навантаження. Максимальна допустима частота f_p робочих ходів ІВПМ, що відповідає частоті спрацювання вібробудувача ГП, визначається в залежності від типу порошкового матеріалу. Зміну частоти робочих ходів ІВПМ-5Л для постійної величини енергії E_a , в межах вибраного основного режиму, допускають тільки ВУП-I і ВУП-III. Але, як показали експерименти, зберігаючи відповідні значення енергій $[E_a]$ та $[E_{повн}]$, така зміна частоти робочих ходів не впливає на середню щільність і відносну нерівнощільність «еталонних» зразків [75].

Згідно з резонансно-структурною теорією [16], кожній заготовці з порошкового матеріалу, в залежності від її геометричних (висота) та фізико-механічних (середня щільність, динамічний модуль пружності) параметрів, у початковий і кінцевий моменти процесу формоутворення способом ВУП, повинна відповідати визначена тривалість τ_0 короткочасного імпульсу примусової сили зовнішнього впливу. Для випадків реалізації способів ВУП на ІВПМ таким короткочасним імпульсом сили є імпульс тиску рідини в порожнині приводного гідроциліндра. Його тривалість однозначно визначається величиною енергії E_a . Отже, експериментально встановлена наявність для кожного «еталонного» зразка раціональної величини енергії $[E_a]$, що підтверджує зазначене положення резонансно-структурної теорії.

Графічна інтерпретація якісних показників заготовок при ВУП (рис. 4.4) отриманих в статистичному середовищі Statistica 10.1 додатково підтвердила обрані (рис. 4.3) найефективніші режими ВУП: для мінеральних порошоків НЕФ (вологість 13%, зв'язка жирова 3,2 %) та мінеральних порошоків НЕФ (вологість 2%, зв'язка відсутня) – ВУП-I; карбіду кремнію зел. (№ 4, 10, 12 М28 – 80%, бакеліт 10%, кокс 10%) – ВУП-III; вогнетривкого шамоту (вологість 13,8, зв'язка глиняна 31,2%) – ВУП-II.

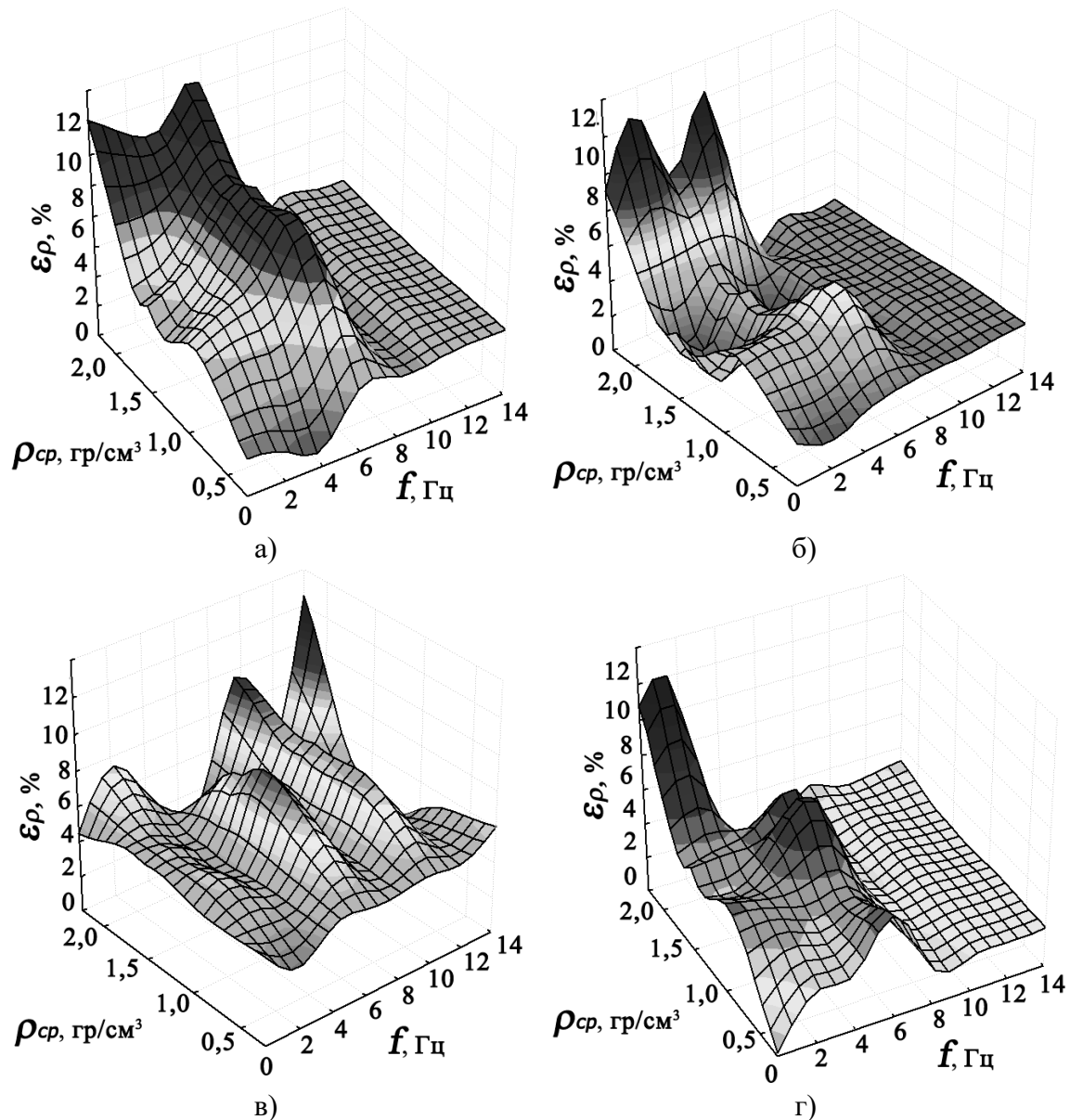


Рис. 4.4. Діаграми якісних характеристик заготовок з порошкових матеріалів в залежності від режиму ВУП:

а – матеріал М1; б – матеріал М2; в – матеріал М3; г – матеріал М4

Для оцінки статистичного розподілу отриманих експериментальних даних якісних характеристик заготовок з порошкових матеріалів було використано метод оцінки квантильного розмаху (рис. 4.5), що визначило концентрацію мінімальних значень для щільності та нерівнощільності вихідних заготовок з досліджуваних матеріалів. Для матеріалу з мінеральних порошоків НЕФ М1 (вологість 13%, зв'язка жиrowa 3,2 %) (рис. 4.5, а, д) сукупність оптимальних технологічних показників знаходяться в режимі ВУП-I становлять для щільності матеріалу 2,3 гр/см³ для нерівнощільності 6,5%. Оцінка оброблюваного матеріалу з мінеральних порошоків НЕФ М2 (вологість 2%, зв'язка відсутня) (рис. 4.5, б, е) дещо відокремлюється в порівнянні з отриманими даними в математичній моделі, а саме відображає доцільність застосування комбінації технологічних режимів ВУП-I, ВУП-II, при яких якісні характеристик набувають значень: у випадку аналізу щільності її мінімальне значення 1,9 гр/см³ спостерігається при ВУП-II, у випадку аналізу нерівнощільності мінімальне значення 2,3 % – ВУП-I. Дослідження вихідних зразків сформованих з карбиду кремнію зелений М3 (карбід кремнію зелений №4, №10, №12, М28 – 80%; бакеліт рідкий – 10%; кокс нафтовий – 10%) (рис. 4.5, в, ж) засвідчило, що оптимальні значення щільності матеріалу 2,1 та нерівнощільності 3,9 спостерігаються при III режимі віброударного пресування. У випадку з оцінюванням якісних характеристик спресованих матеріалів з вогнетривкого шамоту М4 (вологість 13,8, зв'язка глиняна 31,2%) (рис. 4.5, г, з) слід відзначити, що мінімальні значення щільності та нерівнощільності, відповідно рівні 2,1–2,29 гр/см³ та 3,8–4,2 % і спостерігаються при ВУП-I та ВУП-II.

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

Проведений аналіз засвідчив адекватність розробленого комплексного математичного апарату для оцінювання динамічної зміни середньої щільності та нерівнощільності отриманих виробів в залежності від зміни робочих режимів обробки, а також встановив доцільність часового обмеження формування кінцевого виробу.

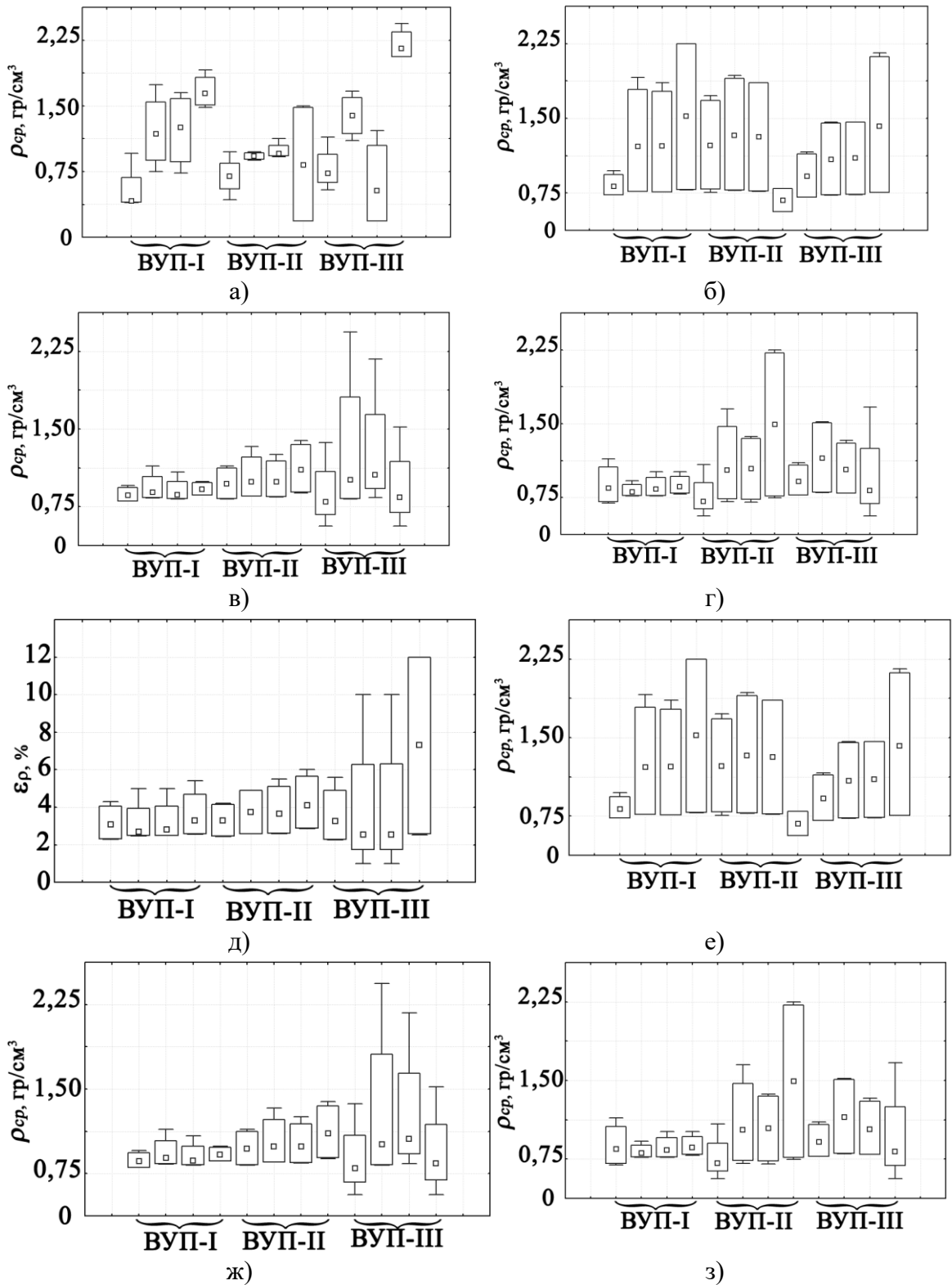


Рис. 4.5. Діаграми квантилю розмаху для середньої щільності (а, б, в, г) і нерівнощільності (д, е, ж, з) оброблюваних матеріалів залежно від режимів ВУП: а, д – матеріал М1; б, е – матеріал М2; в, ж – матеріал М3; г, з – матеріал М4

□ - мода; □ – дисперсія; I – розмах значень без вібраковки

На графічній інтерпретації (рис. 4.6) представлені залежності середньої щільності та нерівнощільності отриманих виробів для тривалості процесу ВУП $t=3, 4, 5, 7$ с в залежності від технологічних параметрів режимів ВУП.

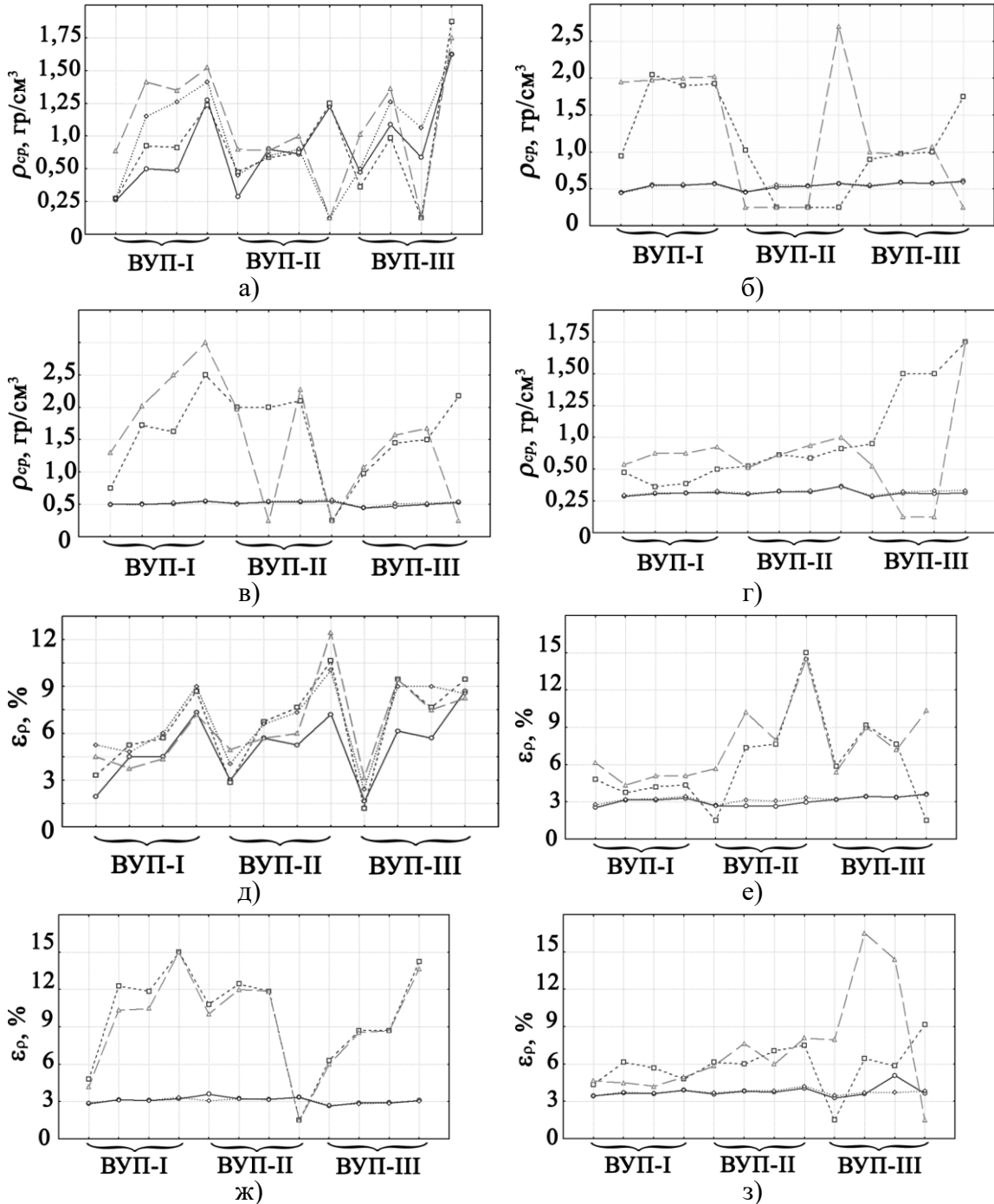


Рис. 4.6. Діаграми зміни середньої щільності (а, б, в, г) і нерівнощільності (д, е, ж, з) оброблюваних матеріалів залежно від режимів ВУП:
 а, д – час ВУП 3 с; б, е – час ВУП 4 с; в, ж – час ВУП 5 с; г, з – час ВУП 7 с
 — – матеріал М1; - - - матеріал М2; - · - · - матеріал М3; ···· – матеріал М4

На графічній інтерпретації (рис. 4.6) залежності середньої щільності та нерівнощільності отриманих виробів від технологічних параметрів режимів ВУП чітко спостерігається оптимальний час 3 секунди, а подальше його збільшення призводить до значних енергозатрат і як наслідок, – до підвищення собівартості кінцевого виробу за сталих показників якості.

Аналіз статистичного взаємозв'язку якісних характеристик досліджуваних матеріалів засвідчив, що оптимальними технологічними параметрами обробки матеріалів М1, М2 є тиск 0,12 МПа, М3 – 0,15 МПа, М4 – 0,13 МПа, проте слід відзначити зростання досліджуваних показників щільності та нерівнощільності оброблюваного матеріалу при збільшенні енергетичних характеристик обробки та зменшенні частоти коливань технологічного впливу.

5 ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІБРОУДАРНОГО ПРЕСУВАННЯ

5.1 Автоматизація розрахунку і проектування технологічного комплексу для віброударного пресування

При схемотехнічному аналізі технологічного комплексу віброударного пресування (рис. 5.1) джерелом вхідної інформації служать відомості про оброблюваний об'єкт, які містяться в компоненті підсистеми та передаються у систему II у вигляді логічної функції вибору режиму ВУП. Режим, в свою чергу, визначає робочий процес, з урахуванням параметрів якого проводиться вибір машини конкретного типу (система III) [62, 75].

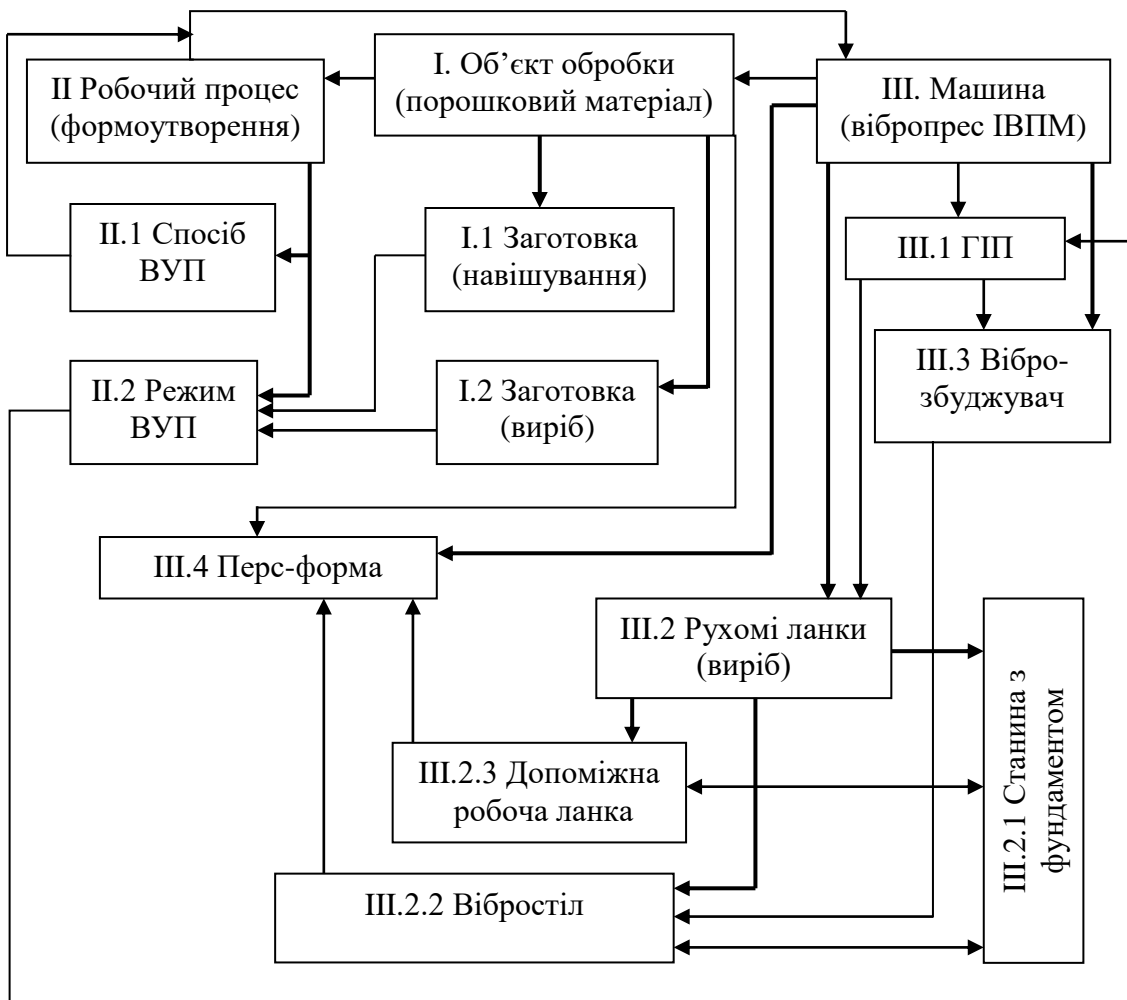


Рис. 5.1. Схема структурних та функціональних зв'язків технологічного комплексу на базі ІВПМ

Логічні функції вибору режиму ВУП розробляються на основі результатів теоретичних досліджень, методів розрахунку параметрів режимів інерційного навантаження під час ВУП, нових конструкцій ІВПМ, їхніх структурних схем та динамічних моделей, досліджень перехідних процесів взаємодії рухомих ланок ІВПМ [5].

Функції вибору режиму ВУП можуть бути подані у формі аналітичних залежностей, таблиць і різноманітних банків інформації з ключем для їх розшифрування. Функціональний зв'язок між машиною та об'єктом у вигляді функції силового впливу визначається для заданого проміжку часу, що дозволяє отримати вихідну інформацію, яка так само, як і вхідна, пов'язана з об'єктом обробки, але міститься в складовій компоненті підсистеми І.2, яка відповідає кінцевій заготовці. Функціональний зв'язок між компонентою підсистеми ІІІ.3 та ланкою ІІІ.2.2 має вигляд функції генерування тиску в порожнині робочого циліндра, який періодично змінюється в часі [75].

Вихідними даними проектування ІВПМ є параметри заготовки, а саме характеристики кінцевого стану. До них належат: маса заготовки m_{zag} ; лінійний середньостатичний розмір частинки матеріалу a , значення середньої щільності заготовки в початковий ρ_{30} та кінцевий ρ_{zk} моменти ВУП і відповідні їм значення модуля умовної пружності K_{30} , K_{zk} , які визначаються експериментальним шляхом. Початковий стан матеріалу будемо визначати величиною питомого зусилля статичного притискання $p_{ст}$, що вибирається у відповідних межах 0,1–1,0 МПа. Для кінцевої продукції паралелепіпедної форми блок вихідних даних доповнимо значенням площі її відкритої поверхні S_{zag} . Використовуючи вихідні дані про кінцеву продукцію, розробимо алгоритм методики розрахунку параметрів її інерційного навантаження під час ВУП (рис. 5.2).

В перелік вихідних даних (блок 1) додатково введемо параметр m_1 , який враховує зведену масу робочої ланки інерційного вібропреса механізму (ІВПМ). Його вибираємо з конструктивних міркувань, і в подальшому він може корегуватись [75].

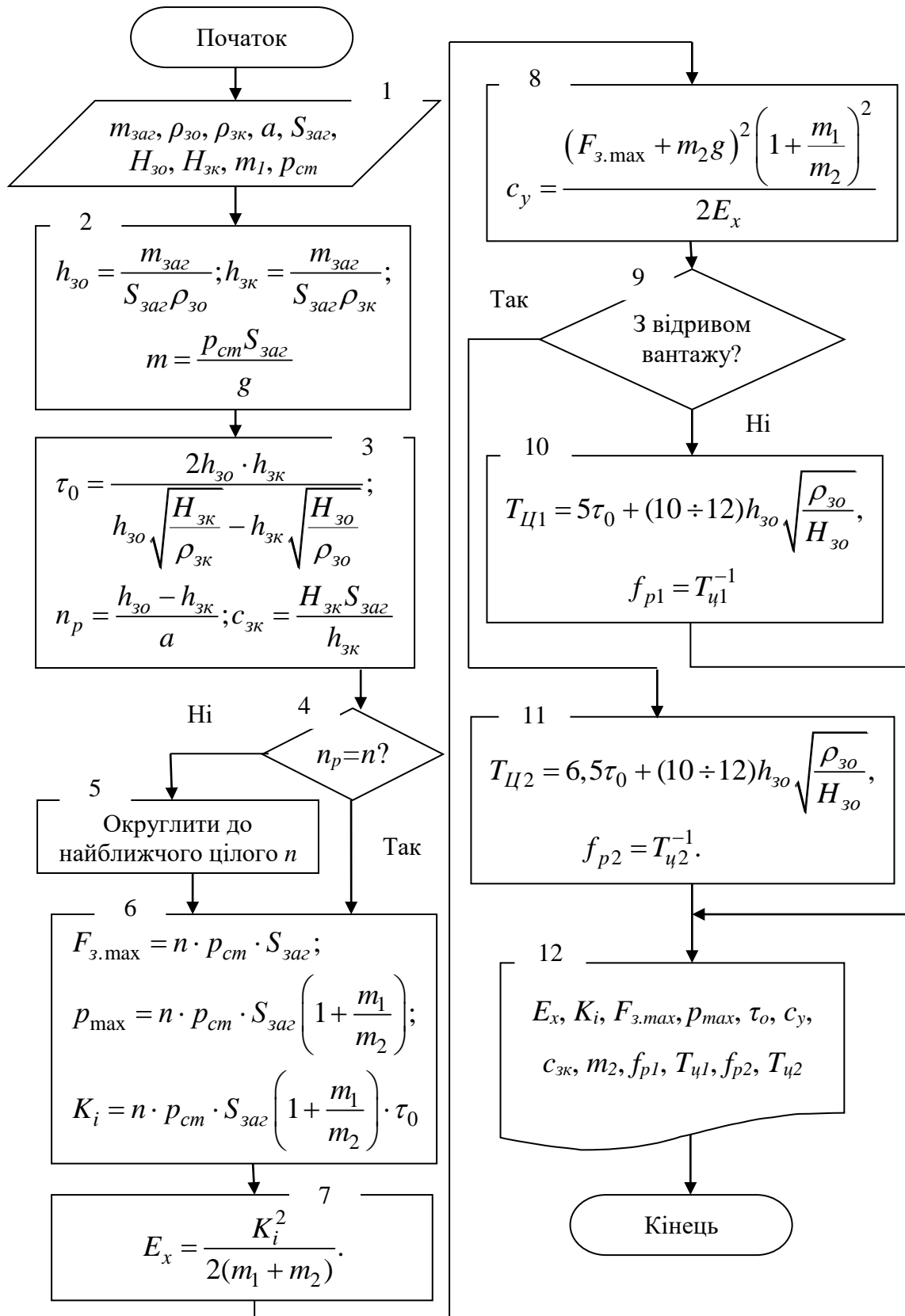


Рис. 5.2. Блок-схема алгоритму методики розрахунку параметрів інерційного навантаження кінцевої продукції

Після розрахунку додаткових параметрів вихідної цільової продукції h_{30} , $h_{3к}$ та масу інерційного вантажу m_2 (блок 2) у відомій послідовності визначаємо тривалість ударного імпульсу τ_0 , розрахункове число компонентів пакету хвиль в складному імпульсі n_p та допоміжний параметр $c_{зк}$, який разом із пармаетром $K_{зк}$ характеризує умовну жорсткість відпресованої цільової продукції паралелепіпедної конфігурації (блок 3) [75].

Отримане значення n_p округлимо до найближчого цілого n (блоки 4, 5) і використовуємо при обчисленні максимальних значень зусилля пресування $F_{з.мах}$ на робочій ланці $P_{мах}$, імпульс зовнішніх сил K_i , енергію робочого ходу E_1 , та жорсткості елементів пружного повернення робочого столу c_y (блоки 6, 7, 8) [75].

Максимальну допустиму частоту f_p і відповідний їй мінімальний період впливу на кінцеву продукцію ударних імпульсів зовнішніх сил T_u встановлюємо для двох можливих режимів інерційного навантаження: без відриву – f_{p1} , T_{u1} ; і з відривом f_{p2} , T_{u2} від пресування інерційного вантажу (блоки 9, 10, 11) [75].

Результати, які були отримані в попередніх розрахунках, вводимо у блок 12 для обчислення конструктивних параметрів ІВПМ та параметрів їхніх робочих режимів [75].

Для визначення конструктивних параметрів за вихідні будемо використовувати задані і розрахункові параметри інерційного навантаження кінцевої продукції E_x , K_i , m_i , m_2 , c_y , $c_{зк}$, що фігурують в блок – схемі (2). Вказані дані доповнюємо параметрами ІВПМ нормативного характеру. До них відносять жорсткість ґрунту C_{rp} , на якому встановлений ІВПМ, допустиме переміщення $[x]_{нк}$ і площу основи підтримуваної конструкції машини $S_{нк}$. Крім цього, в якості вихідних параметрів прийняли тиск відкриття запірного елемента віброзбуджувача p_1 , зведений модуль об'ємної пружності рідини K_{np} , площу у плунжера гідроциліндра ГП S_{nl} і попередньої деформації пружин пружного повернення $X_{деф}$.

Блок-схема алгоритму вищезгаданої методики розрахунку показано на рисунку 5.3.

За вихідними даними (блок 1) безпосередньо визначаємо розрахункову енергію одноциклового гідроаккумулятора E_a , зведену жорсткість c_n та сумарну зведену масу m_Σ – блок 2. Вказані розрахункові

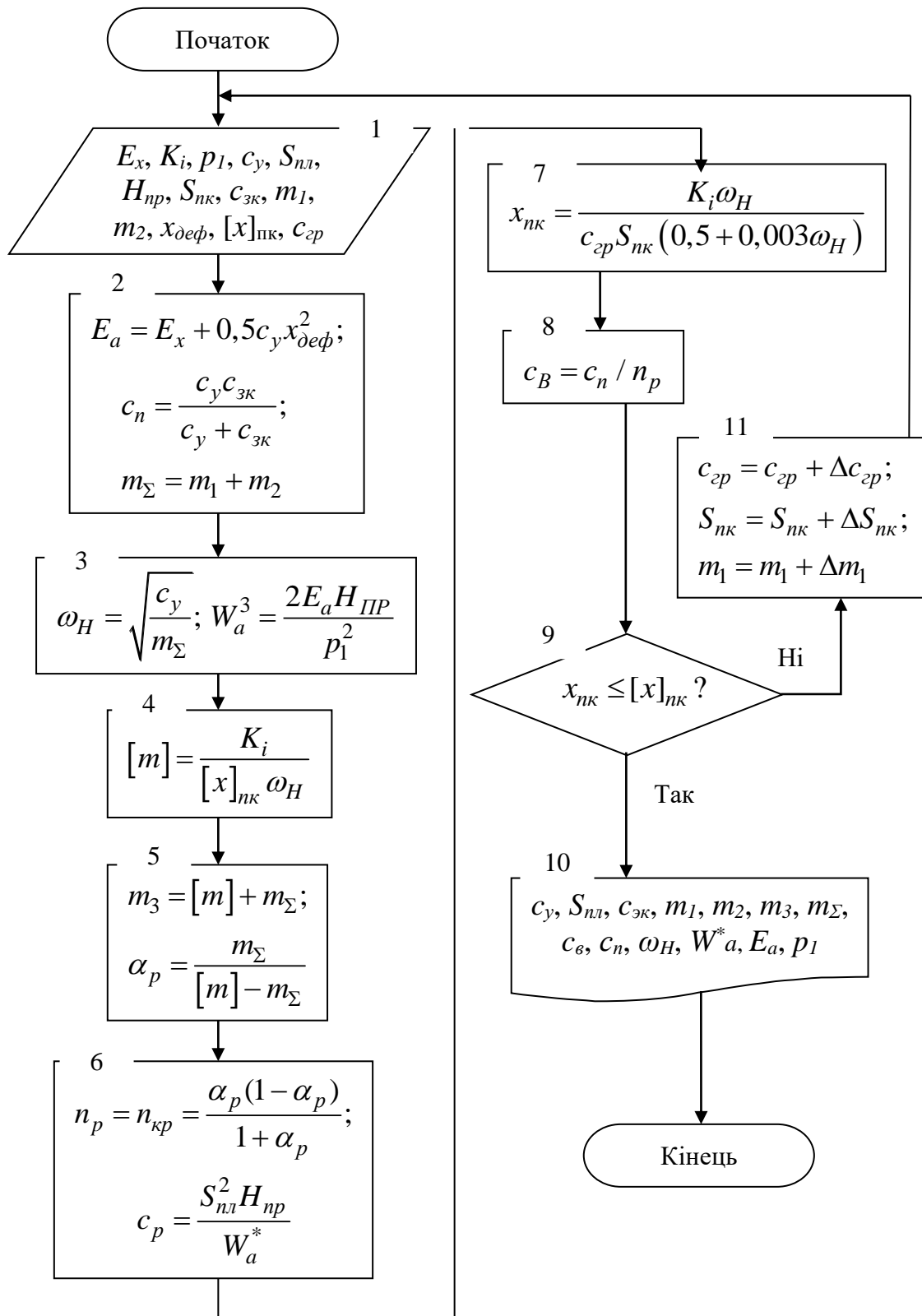


Рис. 5.3. Блок-схема алгоритму методики розрахунку конструктивних параметрів ІВПМ

параметри використовуються при визначенні власної частоти коливань робочої ланки ω_n та об'єму гідросистеми, що акомулює W_a – блок 3 [75].

Далі визначаємо допустиму масу рухомих ланок $[m]$, масу станини m_3 , відносний параметр λ_p , критичне значення відносного параметра $n_{кр}$, жорсткість гідросистеми c_p , розрахункові переміщення підтримувальної конструкції $X_{нк}$ та розрахункову жорсткість віброізоляторів c_v ІВПМ – блоки 4-7 [75].

При виконанні умови віброізоляції $X_{нк} \leq [x]_{нк}$ (блок 8) розраховані конструктивні параметри (блок 9) можуть бути використані безпосередньо в проектуванні ІВПМ. Якщо умови віброізоляції не виконуються, тоді необхідне додаткове корегування в бік збільшення нормативних параметрів віброізоляції $c_{зр}$, $S_{нк}$ або параметра m_1 , що призначається конструктивно – блок 10. Після корегування вихідних даних (блок 1) розрахунок повторюється.

Вихідну інформацію про конструктивні параметри ІВПМ (блок 9), у разі використання комп'ютерних методів розрахунку, доцільно подавати у розширеному вигляді, вносячи до неї деякі вихідні дані (блок 1), що полегшує виконання проектних робіт.

На основі блок–схем, що є графічним зображенням розрахунку основних параметрів ІВПМ та параметрів заготовки, вперше створена програма, функціональна частина якої запрограмована мовою JavaScript [132] та вбудована у WEB-сторінку для оптимізації програмного комплексу. Програма призначена для автоматизації розрахунку параметрів інерційного навантаження кінцевої продукції та розрахунку конструктивних параметрів ІВПМ.

JavaScript (JS) – динамічна, об'єктно-орієнтована мова програмування, реалізація стандарту ECMA Script. Найчастіше використовується як частина браузера, що дає можливість коду на стороні клієнта (такому, що виконується на пристрої кінцевого користувача) взаємодіяти з користувачем, керувати браузером, асинхронно обмінюватися даними з сервером, змінювати структуру та зовнішній вигляд веб-сторінки.

Програму ми поділили на два кроки. Перша частина розраховує параметри інерційного навантаження кінцевої продукції (рис. 5.4). Друга частина програми на ЕОМ розраховує конструктивні параметри ІВПМ (рис. 5.5).

Персональний кабінет x Начальная страница Mozilla Firefox x ТЕСТ :: Вибропресове та вібраційне ... x +

file:///E:/gip/gip.html

Яндекс

Крок 1. Базові параметри: Повернути еталонні значення

| | | | |
|---|-------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Маса навішення | $m_{зар}$ | <input type="text" value="0.44"/> | кг |
| Лінійний розмір частинок матеріалу заготовки | a | <input type="text" value="100"/> | нм |
| Значення середньої щільності заготовки | у початковий момент ВУП | <input type="text" value="1430"/> | кг/м ³ |
| | у кінцевий момент ВУП | <input type="text" value="2360"/> | кг/м ³ |
| Модуль умовної пружності | у початковий момент ВУП | <input type="text" value="97.413"/> | МПа |
| | у кінцевий момент ВУП | <input type="text" value="259.026"/> | МПа |
| Питоме зусилля статичного притискання | $P_{уд}$ | <input type="text" value="0.300"/> | МПа |
| Площа відкритої поверхні з боку пуансона | $S_{зар}$ | <input type="text" value="0.0024"/> | м ² |
| Параметр, що враховує зведену масу робочої ланки ІВПМ | m_1 | <input type="text" value="1"/> | кг |

а)

Персональний кабінет x Начальная страница Mozilla Firefox x ТЕСТ :: Вибропресове та вібраційне ... x +

file:///E:/gip/gip.html

Крок 1. Розрахункові параметри: Розрахувати

| | | | | |
|--|-------------------------|---|--|-----|
| Додатковий параметр заготовки | у початковий момент ВУП | $h_{з0} = \frac{m_{зар}}{S_{зар} \cdot \rho_{з0}}$ | <input type="text" value="0.128205"/> | м |
| | у кінцевий момент ВУП | $h_{зк} = \frac{m_{зар}}{S_{зар} \cdot \rho_{зк}}$ | <input type="text" value="0.077684"/> | м |
| Маса інерційного вантажу | | $m_2 = \frac{P_{фа} \cdot S_{зар}}{g}$ | <input type="text" value="73.419567"/> | кг |
| Тривалість ударного імпульсу | | $\tau_0 = \frac{2h_{з0} \cdot h_{зк}}{h_{з0} \cdot \sqrt{\frac{H_{зк}}{\rho_{зк}}} - h_{зк} \cdot \sqrt{\frac{H_{з0}}{\rho_{з0}}}}$ | <input type="text" value="0.000897"/> | с |
| Розрахункове число хвиль пакету | | $n_p = \frac{h_{з0} - h_{зк}}{a}$ | <input type="text" value="505215.124"/> | - |
| | | $n = n_p $ | <input type="text" value="505215"/> | - |
| Допоміжний параметр, що характеризує умовну жорсткість | | $c_{зк} = \frac{H_{зк} \cdot S_{зар}}{h_{зк}}$ | <input type="text" value="8002490.531"/> | Н/м |
| Максимальне значення зусилля пресування | | $F_{з, макс} = n \cdot P_{фа} \cdot S_{зар}$ | <input type="text" value="363754800.000"/> | Н |
| Максимальне значення зусилля на робочій ланці | | $P_{max} = n \cdot P_{фа} \cdot S_{зар} \cdot (1 + \frac{m_1}{m_2})$ | <input type="text" value="368709266.680"/> | Н |

б)

Рис. 5.4. Меню програми на ЕОМ для розрахунку параметрів інерційного навантаження заготовки:

а – меню введення початкових базових параметрів; б – меню результатів розрахунку параметрів кінцевої продукції ВУП

Персональний кабінет x Начальная страница Mozilla Firefox x ТЕСТ :: Вібропресове та вібраційне ... x +

file:///E:/gip/gip.html

Крок 2. Параметри ІВПМ нормативного характеру: Повернути еталонні значення

| | | | |
|---|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Можливе додаткове коригування параметру m_1 | Δm_1 | <input type="text" value="0"/> | кг |
| Жорсткість ґрунту | $c_{гр}$ | <input type="text" value="80.000"/> | $10^6 \cdot \text{Н/м}^2$ |
| Можливе додаткове коригування жорсткості $c_{гр}$ | $\Delta c_{гр}$ | <input type="text" value="2.000"/> | $10^6 \cdot \text{Н/м}^2$ |
| Допустиме переміщення | $[x]_{пк}$ | <input type="text" value="0.006"/> | м |
| Площа основи підтримувальної конструкції машини | $S_{пк}$ | <input type="text" value="1"/> | м^2 |
| Можливе додаткове коригування площі $S_{пк}$ | $\Delta S_{пк}$ | <input type="text" value="0"/> | м^2 |
| Тиск відкриття запірного елемента вібробуджувача | p_1 | <input type="text" value="16.000"/> | $10^6 \cdot \text{Н/м}^2$ |
| Зведений модуль об'ємної пружності рідини | $H_{сп}$ | <input type="text" value="6.000"/> | $10^{-10} \cdot \text{м}^2/\text{с}$ |
| Площа плунжера гідроциліндра ГП | $S_{пл}$ | <input type="text" value="0.0151"/> | м^2 |
| Попередня деформація пружин пружного повернення | $x_{деф}$ | <input type="text" value="0.02"/> | м |

а)

Персональний кабінет x Начальная страница Mozilla Firefox x ТЕСТ :: Вібропресове та вібраційне ... x +

file:///E:/gip/gip.html

Крок 2. Розрахункові параметри: Розрахувати

| | | | |
|--|---|---------------|----------------|
| Розрахункова енергія одноциклового гідроаккумулятора | $E_a = E_x + 0.5 \cdot c_y \cdot x_{деф}^2$ | 735443235.470 | Дж |
| Зведена жорсткість | $c_a = \frac{c_y \cdot c_{пк}}{c_y + c_{пк}}$ | 7364834.363 | Н/м^2 |
| Сумарна зведена маса | $m_{\Sigma} = m_1 + m_2$ | 74.419567 | кг |
| Власна частота коливань робочої ланки | $\omega_n = \sqrt{\frac{c_y}{m_{\Sigma}}}$ | 1114.441365 | Гц |
| Об'єм гідросистеми, що акумулює | $W_a = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot E_a \cdot H_{сп}}{p_1^3}}$ | 0.000015 | м^3 |
| Допустима маса рухомих ланок | $[m] = \frac{K_i}{[x]_{пк} \cdot \omega_n}$ | 49478.806488 | кг |
| Маса станини з фундаментом | $m_{ш} = [m] + m_{\Sigma}$ | 49553.226055 | кг |
| Відносний параметр | $\alpha_p = \frac{m_{\Sigma}}{[m] - m_{\Sigma}}$ | 0.001506 | - |
| Критичне значення відносного параметра | $n_p = n_{сп} = \frac{\alpha_p \cdot (1 - \alpha_p)}{1 + \alpha_p}$ | 0.001502 | - |

б)

Рис. 5.5. Розрахунок конструктивних параметрів ІВПМ:
а – меню введення початкових базових параметрів; б – меню результатів розрахунку конструктивних параметрів ІВПМ

5.2 Оцінка ефективності та прогнозування роботи технологічного комплексу

Ресурс – це час функціонування технологічного комплексу до появи відмови. Це нестала величина і залежить від багатьох факторів, як зовнішніх, властивим умовам експлуатації, так і внутрішніх.

Кожна система технологічного комплексу характеризується величиною, що забезпечує відношення одних складових елементів відносно інших. Для оцінки стану системи використаємо коефіцієнт залишкового або використаного ресурсу [31, 57, 84]:

$$R_{зал} = (P_{Г} - P_{Ф}) / (P_{Г} - P_{Н}), \quad (5.1)$$

де $R_{зал}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу, причому $1 \geq R_{зал} \geq 0$; $P_{Г}$ – граничне, $P_{Ф}$ – фактичне, $P_{Н}$ – номінальне значення системи.

Як видно з (5.1), коефіцієнт залишкового ресурсу за час нормальної роботи технологічного комплексу змінюється від одиниці до нуля, він наближено вказує частку фактичного ресурсу системи. Коефіцієнт використаного ресурсу визначимо за формулою:

$$R_{вик} = 1 - R_{зал}. \quad (5.2)$$

Він характеризує частоту фактичного ресурсу системи, яка вже використана за час її експлуатації і змінюється у межах $0 \leq R_{вик} \leq 1$, тобто змінюється від нуля до одиниці. Аналізуючи бачимо, що $R_{вик}$ і $R_{зал}$ знаходяться у залежності. За допомогою запропонованих нами коефіцієнтів стан будь-якого фізичного параметра можна охарактеризувати універсальним оцінним показником.

У загальному вигляді ми охарактеризували метод діагностики ресурсу, оцінювання ефективності роботи технологічного комплексу. Залишається проаналізувати важливі задачі зв'язку та взаємовпливу між діагностикою та прогнозуванням забезпечення ефективного функціонування технологічного комплексу.

Для реалізації методу діагностики ресурсу пропонуємо розробити такі підходи: лінійного прогнозування, середньостатистичного прогнозування, автоматизованого комп'ютерного прогнозування.

Послідовно розглянемо названі три позиції діагностування, які тісно пов'язанні з прогнозуванням цих же процесів.

1. Підхід лінійного прогнозування. Лінійне прогнозування є найпростішим способом, який полягає у припущенні, що умови експлуа-

тації залишаються незмінними, а залежність зміни параметра від часу буде лінійною. Завдяки цим припущенням для одержання прогнозу достатньо знати лише такі величини: напрацювання на відмову з початку експлуатації – T_H ; номінальне – Π_n , граничне – Π_c та фактичне – Π_f значення параметрів системи. Тоді формула лінійного прогнозування буде мати вигляд:

$$T_{зал} = T_H(R_{зал}/R_{вик}), \quad (5.3)$$

де $R_{зал}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу, $R_{вик}$ – коефіцієнт використаного ресурсу.

2. Середньостатистичне прогнозування. Важливою складовою нашого методу є визначення залежності між системою технологічного комплексу. Велика кількість спостережень дає змогу застосувати для обробки методи математичної статистики та комп'ютерні засоби.

У зв'язку із впливом випадкових факторів, закономірність зміни стану системи має різний характер. Однак чим ретельніше буде обстежений технологічний комплекс, тим виразніше буде виявлятися зона, у якій щільність кривих $\Pi(t)$ значно більша, ніж в зонах по обидва боки від неї (рис. 5.6).

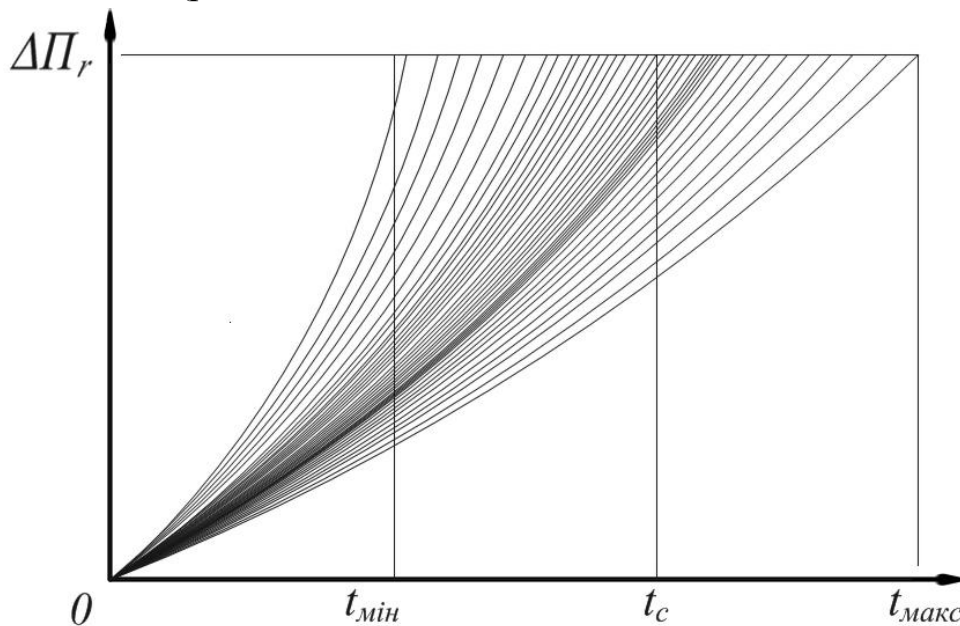


Рис. 5.6. Статистичні криві залежності зміни стану системи

Горизонтальна лінія, проведена з точки граничного значення параметра $\Delta\Pi_r$, перетинається з середньою лінією t_c залежності у точці, яка відповідає середньому ресурсу системи.

Деякі лінії перетинають вказану горизонталь по обидва боки від середнього значення, створюючи розсіювання фактичних ресурсів окремих об'єктів відносно середнього ресурсу. Це розсіювання ми оцінювали показниками коефіцієнта варіації, стандартного відхилення, дисперсії, які характеризують ступінь невизначення процесу.

У [84] підкреслено, що, незалежно від розміщення на графіку кривої даного реального об'єкта, її визначають за такою ж формулою з однаковими значеннями показника α , але з так званим коефіцієнтом a , властивим лише даному конкретному об'єкту. Отже, коефіцієнт a визначає масштаб залежності або швидкість зміни параметра. Величина показника α є спільною для усіх однотипних об'єктів.

Таким чином, під час прогнозування за середньостатистичними даними визначають ймовірність того, що протягом заданого часу t_m , даний параметр не вийде за межі граничного значення і відмова у системі не настане. Величина t_m являє собою заздалегідь передбачену періодичність технічного обслуговування або ремонту. Якщо під час функціонування системи стан менший за допустимий, то гарантується безвідмовна її робота до наступного кроку діагностування.

Між кількістю діагностувань, для яких гарантується відсутність відмови, та припустимими значеннями існує така залежність:

$$n = \frac{1}{1 - \alpha \sqrt{P_D / P_G}}, \quad (5.4)$$

де n – кількість перевірок; α – показник степеня залежності $P(t)$; P_G – граничне, P_D – допустиме значення параметра стану системи.

Врахуємо лише цілу частину результату, а залишок відкинемо. Дійсно, кількість перевірок не може становити не ціле число, тому дробну частину відкидаємо і залишаємо цілу. Найменша ймовірність відмови спостерігається при $n=2$. У цьому випадку допустима величина параметра становитиме:

$$P_D = 0,5^\alpha \cdot P_G. \quad (5.5)$$

При $\alpha=1$, $P_D=0,5P_G$, тобто дорівнює половині граничної зміни параметра.

Виходячи з величини P_D або n , та враховуючи задану періодичність t_m , визначимо найбільш ймовірний стан залишкового ресурсу t_p досліджуваної системи:

$$t_p = \alpha \sqrt{P_G / P_D} (n-1)t_M \quad (5.6)$$

Якщо $\alpha=1$, $n=2$, $P_{Д.О.}=0,5P_{Г}$, то залишковий ресурс системи становитиме $t_p=2t_M$.

Зазначені допустимі значення параметрів, запропонованих нами для технологічного комплексу, дають можливість звести до мінімуму витрати на їхнє технічне обслуговування.

У зв'язку зі сказаним визначимо оптимальні допустимі значення плинності параметрів:

$$P_{Д.О.}^{ОПТ} = \sqrt[\alpha]{\frac{m}{(d-m)(N-1)}}, \quad (5.7)$$

де N – відношення середніх витрат на усунення відмови до середніх витрат на технічне обслуговування. У формулі (5.7) допустима зміна параметра виражена не в абсолютних одиницях, а в частинах від граничної зміни, тобто від значення допуску ($P_{Г}-P_{Н}$). Величина d та m – це показники степеня залежностей ймовірності відмови:

$$Q(P_{Д.О.}) = P_{Д.О.}^d, \quad (5.8)$$

та фактичного залишкового ресурсу

$$t_{\Phi}^0(P_{Д.О.}) = t^0 P_{Д.О.}^m, \quad (5.9)$$

де t^0 – відносне міжконтрольне напрацювання на відмову $t^0=t_{cp}/t_M$.

Величини показників d та m визначимо методом найменших квадратів. Запропонований нами підхід прогнозування потребує 200–500 спостережень за аналогічними об'єктами та застосування комп'ютерної техніки.

Ймовірність відмови зменшується зі зменшенням допустимої величини зміни параметра до величини $0,5^{\alpha}$, а потім залишається незмінною; при $P_{Д.О.}=1$ ймовірність відмови дорівнює одиниці; зі зменшенням проміжків діагностування t_M ймовірність відмови зменшується; зі зменшенням допустимої величини $P_{Д.О.}$ ймовірність відмови також зменшується.

Прикінцевим положенням середньостатистичного прогнозування є визначення витрат, що пов'язані з усуненням відмов технологічного комплексу. Використаємо формулу виду:

$$A = X_1 g_1 r_1 + X_2 g_2 r_2 + X_3 g_3 + X_4 + S(t), \quad (5.10)$$

де X_1 – трудомісткість усунення відмови (оцінка в годинах); g_1 – середня годинна тарифна ставка працівника, зайнятого усуненням відмови (оцінка у гривнях); r_1 – коефіцієнт, що враховує нарахування

на заробітну плату та накладні витрати; X_2 – вартість запасних частин, що витрачаються на усунення відмови (оцінка у гривнях); g_2 – коефіцієнт, що враховує вартість ремонтних матеріалів, які будемо витрачати для усунення відмови; r_2 – коефіцієнт, що враховує націнку на запасні частини та матеріали (у середньому дорівнює 1,12); X_3 – тривалість не функціонування технологічного комплексу під час відмови (оцінка в годинах); g_3 – середні втрати від простою вібропресої машини 1 годину (оцінка в гривнях); X_4 – транспортні витрати, що пов'язані з доставкою запасних частин до місця усунення відмови (оцінка у гривнях); S – втрати за рахунок погіршення якості роботи технологічного комплексу, зниження її економічності (оцінка у гривнях).

У свою чергу, середні втрати для виконання технічного обслуговування визначили за формулою:

$$S(t) = X_1 g_1 r_1 + X_2 g_2 r_2. \quad (5.11)$$

Отже, поставлену задачу визначення витрат, які пов'язані з усуненням відмов технологічного комплексу виконано.

3. Автоматизація та комп'ютеризація процесів прогнозування функціонування технологічного комплексу. Дослідження та підрахунки прогнозу вручну досить складні, за винятком лінійного прогнозування, де необхідно розв'язати лише просту пропорцію з одним невідомим, оцінка точності якого досить висока.

5.3 Визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії

Спосіб визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії, який включає виділення вібросигналів на резонансній частоті вібродатчика, базується на нормуванні та виділенні в них амплітудних груп. Нормування вібросигналів проводять за огинаючими, серед яких виділяють амплітудні групи. Виділені амплітудні групи частот сигналів, що повторюються, порівнюють з частотами власних обертових коливань рухомих елементів механічної системи. Після чого вимірюють кількість спрацювань, тиск робочої рідини у акумуляторній гідролінії, тиск у порожнині гідроциліндра, вертикаль-

ні переміщення вібростолу і визначають коефіцієнт ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії [99].

Створення такого способу визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії, за рахунок введення нових операцій та їх послідовності, розширюються функціональні можливості даного способу. Поставлена задача вирішується тим, що при виділенні вібросигналів на резонансній частоті вібродатчика, їх нормування та виділення в них амплітудних груп, нормування вібросигналів проводять за огинаючими, серед яких виділяють амплітудні групи. У виділених амплітудних групах частоти сигналів, що повторюються, порівнюють з частотами власних обертових коливань рухомих елементів механічної системи. Згідно з корисною моделлю, вимірюють кількість спрацювань, тиск робочої рідини в акумуляторній гідролінії, тиск у порожнині гідроциліндра, вертикальні переміщення вібростолу, а потім визначають коефіцієнт ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії.

Даний спосіб здійснюється наступним чином: за паспортними даними розраховують обертові частоти всіх рухомих елементів механічної системи; встановлюють вібродатчик поруч з рухомих елементом механічної системи; підключають послідовно фільтр, що налаштований на резонансну частоту вібродатчика та вузол детектування до виходу приладу знімання вібросигналів. В отриманих вібросигналах будують огинаючі, серед яких виділяють амплітудні групи. У виділених амплітудних групах частоти сигналів, що повторюються, порівнюють з частотами власних обертових коливань елементів механічної системи, тим самим вилучаючи із суміші вібросигналів ті, що стосуються конкретного елемента. Вимірюють кількість спрацювань; вимірюють тиск робочої рідини в акумуляторній гідролінії; вимірюють тиск у порожнині гідроциліндра; вимірюють вертикальні переміщення вібростолу; вимірюють робочі характеристики гідроімпульсного приводу за допомогою вимірювального комплексу для реєстрації робочих характеристик гідроімпульсного приводу, який складається з тензопідсилювача з блоком живлення і магазином опорів; світлопроменевого осцилографа з випрямлячем; вібровимірювальної апаратури; міліамперметра; трубчастих тензодатчиків тиску; балочних тензодатчиків переміщення; датчиків прискорення (акселерометрів); манометра; шумоміра, витратомірів (мірних ємностей) та термометра. Всю вимірюва-

льну та реєструвальну апаратура вибирають з дотриманням вимог точності експериментальних досліджень; визначають коефіцієнт ресурсу по параметру кількості перемикачів; визначають коефіцієнт ресурсу по параметру тиск робочої рідини у акумуляторній гідролінії; визначають коефіцієнт ресурсу по параметру тиску у порожнині гідроциліндра; визначають коефіцієнт ресурсу по параметру вертикального переміщення вібростолу; визначають коефіцієнт ефективності функціонування гідроімпульсного приводу, за допомогою вагових коефіцієнтів. Приймають рішення про подальшу експлуатацію, ремонт чи заміну окремих елементів, чи виведення з експлуатації досліджуваного гідроімпульсного приводу тривалої дії. При використанні запропонованого способу зменшується гідроімпульсний привод тривалої дії, зростає термін безаварійної роботи та забезпечується ощадливе використання його технічного ресурсу [99].

5.4 Функціонально-вартісний аналіз технологічного комплексу

Для прийняття раціонального та обґрунтованого рішення доцільно використовувати функціонально-вартісний аналіз (ФВА), що об'єднує різні методи колективного аналізу систем, творчого пошуку, оптимізації та вибору рішень [97].

ФВА базується на системному дослідженні структури функцій об'єкта, зіставлення їхньої корисності та вартості реалізації з метою забезпечення необхідної корисності системи при мінімально можливих сукупних витратах. Отже, прийняття рішень при ФВА здійснюється на основі двох критеріїв – корисності та вартості.

Структурний аналіз технічних і виробничих систем дозволяє виявити диспропорції в розвитку окремих складових, неузгодженість параметрів і взаємодії елементів, що суттєво може впливати на кінцеві показники функціонування системи в цілому.

Функціональна модель відображає впорядковану сукупність функцій системи і зв'язки між ними, що реалізуємо за допомогою методу аналізу функцій FAST (Functional Analysis System Technique), використовуючи різні тестові запитання (Що? Навіщо? Як? Коли? Тощо). Наприклад, для побудови функціональної моделі технологічного процесу зручно використовувати запитання: «Що необхідно для здійснення функції і навіщо здійснюється дана функція?» (рис. 5.7).

Структуризація та аналіз функцій передбачають виділення головної функції, що передбачає мету і призначення системи, основних функцій, без яких не може бути виконана головна, а також допоміжних і надлишкових [97].



Рис. 5.7 – Функціональна модель процесу формоутворення
 Ф0 – навішування; Ф1 – спосіб ВУП; Ф2 – режим ВУП; Ф3 – функціонування ГП; Ф4 – функціонування рухомих ланок ІВПМ; Ф5 – функціонування віброзбуджувача; Ф6 – функціонування прес-форми; Ф7 – заготовка

Функціонально-вартісний аналіз проводимо для однієї із найбільш розповсюджених серед досліджуваних операцій – для процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом.

Для подальшого вибору шляхів проектування системи визначали основні корисні функції (операції), які вона повинна відпрацьовувати при роботі, класифікували функції системи (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Класифікація функцій системи для процесу формоутворення заготовок

| | Назва операції | Характер | Властивість |
|----|--|----------------------|-------------|
| 1. | Ф0 – Навішування | Зовнішня головна | Корисна |
| 2. | Ф1 – Спосіб ВУП | Внутрішня основна | Корисна |
| 3. | Ф2 – Режим ВУП | Внутрішня основна | Корисна |
| 4. | Ф3 – Функціонування ГП | Внутрішня основна | Корисна |
| 5. | Ф4 – Функціонування рухомих ланок ІВПМ | Внутрішня основна | Корисна |
| 6. | Ф5 – Функціонування віброзбуджувача | Внутрішня другорядна | Нейтральна |
| 7. | Ф6 – Функціонування прес-форми | Зовнішня другорядна | Нейтральна |
| 8. | Ф7 – Заготовка | Зовнішня другорядна | Нейтральна |

Проведення ФВА базується на співвідношенні двох критеріїв: корисності та вартості [55]. Коефіцієнт корисності визначали шляхом побудови матриці пріоритетів (табл. 5.2) за відомою методикою розрахунку.

Таблиця 5.2

Матриця пріоритетів для процесу формоутворення заготовок

| | Назва операції | Номер функції | | | | | | | Сума номерів функції | $P_{i,j}$ | Коеф. корисності | Ранг |
|----|--|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------|-----------|------------------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | | | |
| 1. | Ф0 – Навішування | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 7 | 43,75 | 0,22 | 4 |
| 2. | Ф1 – Спосіб ВУП | 1,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 8 | 45,25 | 0,23 | 3 |
| 3. | Ф2 – Режим ВУП | 1,5 | 1,5 | 1 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 10 | 49,25 | 0,26 | 1 |
| 4. | Ф3 – Функціонування ГПП | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 1 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | | 48,5 | 0,24 | 2 |
| 5. | Ф4 – Функціонування рухомих ланок ІВПМ | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 | 0,5 | 4,5 | 7,75 | 0,04 | 5 |
| 6. | Ф5 – Функціонування вібробуджувача | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 1,5 | 6 | 5,5 | 0,03 | 6 |
| 7. | Ф6 – Функціонування прес-форми | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 1 | 5 | 2,5 | 0,01 | 7 |
| 8. | Всього | – | – | – | – | – | – | – | – | 194,76 | – | |

При попарному порівнянні функцій, у відповідних комірках матриці проставляють коефіцієнти переваг. Якщо при попарному порівнянні рядок має перевагу над стовпцем, то коефіцієнт переваг приймають рівним 1,5; при їх однаковій значущості – 0,5; а при меншій – 1.

Витрати при ФВА виступають як плата за корисність. Узагальнюючий критерій витрат при проектуванні технічних чи виробничих систем враховує витрати на всіх етапах життєвого циклу системи, для оцінки яких будують матрицю витрат (табл. 5.3), з якої визначають коефіцієнт витрат [97].

Специфічною процедурою проведення ФВА є побудова функціонально-вартісної діаграми (ФВД), яка є графічним зображенням співвідношення між значущістю функцій і витратами на їх реалізацію [55]. Побудова ФВД здійснюється з метою виявлення невідповідності витрат відносно до корисності (рис. 5.8).

Таблиця 5.3

Матриця витрат

| | Назва операції | Витрати | | Сума витрат | Коеф. витрат | Ранг |
|----|--|---------|--------|-------------|--------------|------|
| | | Прямі | Експл. | | | |
| 1. | Ф0 – Навішування | 2,1 | 2,5 | 4,6 | 0,0040 | 2 |
| 2. | Ф1 – Спосіб ВУП | 1,8 | 2,3 | 4,1 | 0,0038 | 1 |
| 3. | Ф2 – Режим ВУП | 3,2 | 3,6 | 6,8 | 0,0064 | 4 |
| 4. | Ф3 – Функціонування ГП | 1,8 | 2,3 | 4,1 | 0,0039 | 1 |
| 5. | Ф4 – Функціонування рухомих ланок ІВПМ | 3,6 | 3,9 | 7,5 | 0,0071 | 6 |
| 6. | Ф5 – Функціонування віброзбуджувача | 3,5 | 3,8 | 7,3 | 0,0069 | 5 |
| 7. | Ф6 – Функціонування прес-форми | 2,5 | 2,8 | 5,3 | 0,0050 | 3 |
| 8. | Всього | – | – | 39,7 | – | – |

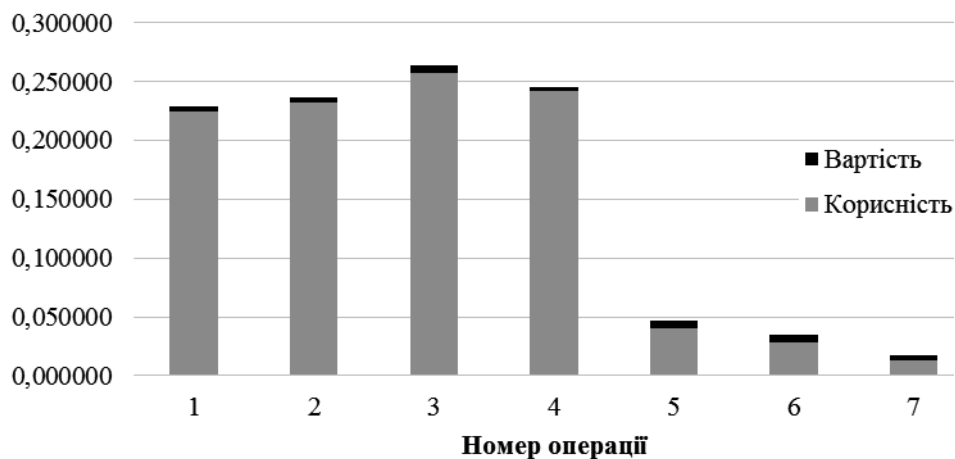


Рис. 5.8. Функціонально-вартісна діаграма процесу формоутворення заготовок: 1 – навішування; 2 – спосіб ВУП; 3 – режим ВУП; 4 – функціонування ГП; 5 – функціонування рухомих ланок ІВПМ; 6 – функціонування віброзбуджувача; 7 – функціонування прес форми

Із діаграми на рисунку 5.8 видно, що перевага корисності над вартістю має операція режиму ВУП.

Побудова ФВП – це графічне відображення співвідношення між критерієм і рангом функції (рис. 5.9) з метою визначення технологічної операції, удосконалення якої забезпечить мінімізацію енергоємності технологічного процесу.

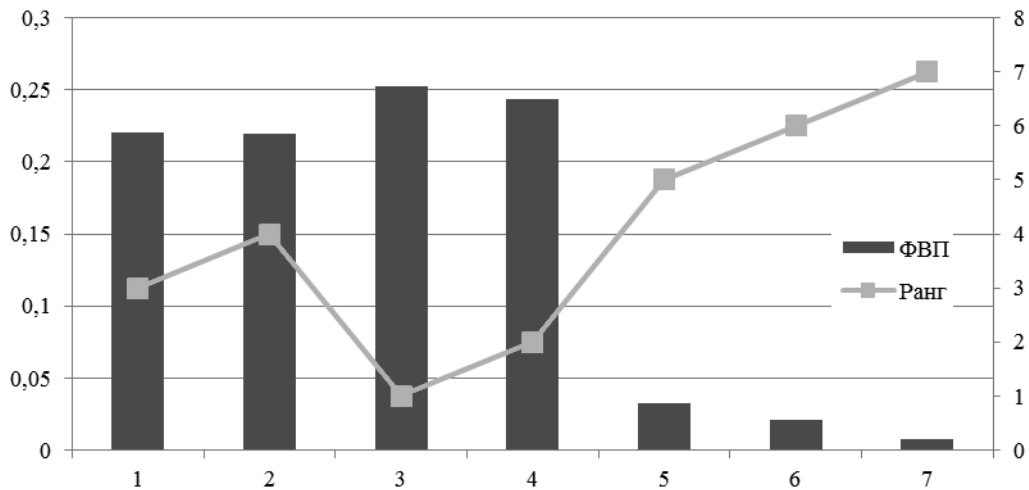


Рис. 5.9. Функціонально-вартісний показник процесу формоутворення

На підставі проведених досліджень та створених моделей, були виявлені шляхи удосконалення роботи вібропресового обладнання на основі ГПІ та запропоновано ряд заходів щодо поліпшення процесу формоутворення виробів з будівельних матеріалів. Зокрема з будівельних сумішей, на ПрАТ «Обласний завод залізобетонних виробів і конструкцій» (м. Вінниця), а також результати цих досліджень використовуються у навчальному процесі у Вінницькому національному технічному університеті та Вінницькому національному аграрному університеті.

ВИСНОВКИ

У даній монографії вирішене науково-технічне завдання виявлення впливу структури та техніко-технологічних параметрів на підвищення ефективності процесів формоутворення заготовок порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом. За результатами досліджень зроблено такі висновки:

1. На основі аналізу сучасного стану функціонування вібраційних машин і вібротехнологій та процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів визначені напрямки досліджень з підвищення ефективності процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів.

2. В результаті дослідження кожної підсистеми технологічного комплексу (заготовка, робочий процес, машина) встановлено, що найдоцільнішим напрямком підвищення ефективності є системний підхід, який надав можливість оцінити параметри кожної підсистеми та визначити зв'язки між ними.

3. Розроблено модель на основі множин вхідних та вихідних параметрів для оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу. Побудовано метод оцінювання стану технологічного комплексу на базі математичного апарату нечітких множин.

4. Виконані експериментальні дослідження вібропресового обладнання з гідроімпульсним приводом для пресування порошкових матеріалів, де удосконалені підходи до оцінювання ефективності прийнятих рішень формоутворення заготовок з порошкових матеріалів.

5. Порівняльний аналіз відхилення теоретичних та експериментальних досліджень за енергетичними та технологічними параметрами досліджуваного обладнання показав, що розбіжність отриманих значень становить 5,8...9,7%. Це підтверджує адекватність математичної моделі та можливість її подальшого використання у розрахунках.

6. На основі теоретичних та експериментальних досліджень доведено, що для порошкових матеріалів М1, М2 ефективним є використання режиму ВУП–І при $P=0,12$ МПа; для порошкового матеріалу М3 – режим ВУП–ІІІ при $P=0,13$ МПа; для порошкового матеріалу М4 – ВУП–ІІ при $P=0,15$ МПа. Це дозволило скоротити час обробки ма-

теріалу, забезпечити мінімізацію енергоємності технологічного процесу і покращити якість заготовки.

7. На основі алгоритмів та побудованих блок-схем розроблена програма для автоматизації розрахунку основних параметрів інерційного навантаження заготовки та конструктивних параметрів ІВПМ у вигляді WEB-сторінки за допомогою Java Script, яка відображає дані в глобальній мережі Internet.

8. Створено спосіб визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії. В основу корисної моделі поставлено задачу створення такого способу, в якому за рахунок введення нових операцій та їх послідовності розширюються функціональні можливості способу. На запропоновану корисну модель отримано патент України.

9. Для прийняття раціонального та обґрунтованого рішення використано функціонально-вартісний аналіз, що надало перевагу саме операції режиму пресування. Вибір цієї технологічної операції забезпечить мінімізацію енергоємності технологічного процесу та якість заготовки з порошкового матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. А. с. 149998 СССР, Класс 49 g, 10₀₁. Одноцилиндровый инерционный гидравлический пресс / И. В. Кононов, И. Б. Матвеев, Р. Г. Давыдова (СССР). – № 751160/25-8; заявлено 09.11.61; Опубл. 01.09.62, Бюл. № 17. – 3 с. : ил.
2. А. с. 337259 СССР, В28в 1/08. Способ изготовления пористых керамических изделий / И. П. Горлов, Б. Х. Седунов, В. Н. Соков (СССР). – № 14850000/29-33; заявлено 03.11.70 ; опубл. 04.06.72, Бюл. № 15. – 2 с.
3. А. с. 429877 СССР, М. Кл. В21j 9/06. Гидравлический инерционный вибропресс / И. В. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий, В. А. Пишенин (СССР). – № 1793622/25-27; заявлено 31.05.72; опубл. 30.05.74, Бюл. № 20. – 2 с.
4. А. с. 515657 СССР, М. Кл.² В30в 15/02. Пресс-форма для вибрационного прессования порошка / Ю. В. Трухан, Ю. М. Шуляков (СССР). – № 2037917/29-33; Заявлено 25.06.74; опубл. 12.07.76, Бюл. № 26. – 3 с. : ил.
5. А. с. 577076 СССР, М. Кл.² В21j 9/06. Вибропресс с импульсным гидроприводом / Р. Д. Искович-Лотоцкий и др. (СССР). – № 2310997/25-27; заявлено 06.01.76; опубл. 25.10.77, Бюл. № 39. – 4 с. : ил.
6. А. с. 595550 СССР, М. Кл.² F15B21/12. Гидравлический вибратор / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Б. Н. Пентюк (СССР). – № 2319462/25-28 ; заявлено 30.01.76; опубл. 28.02.78, Бюл. № 12. – 3 с. : ил.
7. А. с. 601509 СССР, М. Кл.² F16k17/10. Клапан для гидроимпульсного привода / И. В. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий (СССР). – № 2126930/25-08; заявлено 21.04.75; опубл. 05.04.78, Бюл. № 13. – 2с.: ил.
8. А. с. 626296 СССР, М. Кл.² F16k17/10. Импульсный клапан / Р. Д. Искович-Лотоцкий, Н. Н. Вирник (СССР). – № 2464462/25-06; заявлено 21.03.77 ; опубл. 30.09.78, Бюл. № 36. – 3 с. : ил.
9. А. с. 647112 СССР, М. Кл.² В28В1/08. Виброплита к устройству для прессования изделий с подвижных материалов / Р. Д. Искович-Лотоцкий и др. (СССР). – № 2425399/29-33; заявлено 01.12.76; опубл. 15.02.79, Бюл. № 6. – 2 с. : ил.
10. Искович–Лотоцкий Р. Д. Вібраційні та віброударні пристрої для

розвантаження транспортних засобів / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук // Монографія. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2012. – 156 с.

11. Азарова А. О. Математичні моделі та методи оцінювання фінансового стану підприємства / А. О. Азарова, О. В. Рузакова. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 172 с.

12. Аксенов П. Н. Оборудование литейных цехов / П. Н. Аксенов – М. : Машиностроение, 1977. – 510 с.

13. Артоболевский И. И. О машинах вибрационного действия / И. И. Артоболевский, А. П. Бессонов, А. В. Шляхтин – М. : Изд. АН СССР, 1956. – 47 с.

14. Бабичев А. П. Вибрационная обработка деталей / А. П. Бабичев – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Машиностроение, 1974. – 134 с.

15. Баранов В. Н. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные машины / В. Н. Баранов, Ю. Е. Захаров – М. : Машиностроение, 1977. – 326 с.

16. Іскович–Лотоцький Р. Д. Основи резонансно–структурної теорії віброударного розвантаження транспортних засобів / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський// Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – Д., 2014. – №5(53) – С.109 – 118.

17. Беликов О. А. Системно-структурный метод проектирования автоматических формовочных машин / О. А. Беликов // Литейное производство. – 1978. – №4. – С. 10–13.

18. Бальшин М. С. Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна / М. С. Бальшин – М. : Металлургия, 1972. – 336 с.

19. Бауман В. А. Вибрационные машины и процессы в строительстве / В. А. Бауман, И. И. Быховский – М. : Высшая школа, 1977. – 255с.

20. Башта Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика / Т. М. Башта – М. : Машиностроение, 1972. – 354 с.

21. Белов С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.

22. Берник П. С. Конвеєрні вібраційні машини для оздоблювально-зміцнювальної обробки / П. С. Берник, І. П. Паламарчук – К. : Вища школа, 1996. – 237 с.

23. Богоявленский К. Н. Исследование электрогидро-импульсного прессования огнестойких порошковых материалов Огнеупоры. / К. Н. Богоявленский, В.А. Кузнецов // – 1982. - №9. – С. 45 – 49.
24. Бондаренко В. П. Прессование заготовок с твердосплавных смесей / В. П. Бондаренко, Г. Ю. Фрейдин, В. С. Мендельсон – Киев : Техніка, 1974. – 140 с.
25. Бочаров Ю. А. Основы общей теории гидравлических кузнечно-штамповочных машин / Ю. А. Бочаров // Машины и технология обработки металлов давлением.–1980. – Тр. МВТУ № 335. – С. 12–40.
26. Бочаров Ю. А. Структурно-морфологическая классификация кузнечно-штамповочных машин и установок / Ю. А. Бочаров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – №11. – С. 30 – 35.
27. Быховский И. И. Основы теории вибрационной техники. / И.И. Быховский // – М. : Машиностроение, 1969.–363 с.
28. Варсанюфьев В. Д. Некоторые вопросы теории и расчета вибрационных машин с гидравлическим приводом / В. Д. Варсанюфьев, И. Ф. Гончаревич Изд. ИГД. им. А. А. Скочинского, 1965.–178 с.
29. Вербицкий В. И. Современные тенденции совершенствования встряхивающих формовочных машин / В. И. Вербицкий, О. И. Гайн // Литейное производство. – 1983. – № 3.– С. 30–31.
30. Веселовська Н. Р. Задачі моделювання технологічних систем / Н. Р. Веселовська, В. Б. Струтинський, О. В. Зелінська // Всеукраїнський НТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». – 2007. - № 2(47). - С.16-20.
31. Веселовська Н. Р. Задачі математичного моделювання для оптимізації технологічних систем / Н. Р. Веселовська, В. М. Лисогор, О. В. Зелінська // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – № 1. – Том 11.–С. 143-151.
32. Веселовська Н. Р. Загальні принципи підвищення надійності та ефективності діагностування обладнання з гідроімпульсним приводом / Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідраліка і пневматика» – 2012. – №1(35). – С.103–108.
33. Веселовська Н. Р. Створення адекватної моделі системи підтримки прийняття рішень / Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації та трансфер

технологій: від ідеї до прибутку» – Дніпропетровськ, 2012. – С. 189-190.

34. Вибрации в технике : справочник в 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). – М. : Машиностроение, 1981. – Т.4: Вибрационные процессы и машины / под ред. Е. Е. Лавендела. – 1981. – 509 с

35. Іскович–Лотоцький Р. Д. Оптимізація конструктивних параметрів інерційного вібропрес–молота // Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Вісник машинобудування та транспорту. – 2016. – №2. – С. 43 – 50.

36. Вибрационное прессование огнеупорных масс / В. М. Ям, В. Т. Олейник, У. Ф. Степанов и др. // Огнеупоры. – 1973. – № 10. – С. 1–7.

37. Вибрационное уплотнение карбид-кремниевых масс / В. М. Ям, Н. К. Евсеенко, В. Т. Олейник и др. // Огнеупоры. – 1966. – № 10. – С. 30–33.

38. Вибрационные машины в строительстве и производстве : Справочник / [под ред. В. А. Баумана, И. И. Быховского и Б. Г. Гольштейн). – М. : Машиностроение, 1970. – 548 с.

39. Вибропрессование фасонных огнеупорных изделий / В. Т. Олейник, В. М. Ям, Н. И. Выростков и др. // Огнеупоры. – 1981. – № 4. – С. 27–31.

40. Вибропрессование фасонных шамотных изделий / В. Т. Олейник, В. М. Ям, У. У. Власов и др. // Огнеупоры. – 1978. – № 6. – С. 31–34.

41. Виброформование заготовок для получения изделий из монолитного поликристаллического карбида кремния на Броварском заводе порошковой металлургии / [В. В. Иващенко, Г. Г. Гнесин, Э. Я. Попиченко и др.]. // Порошковая металлургия. – 1976. – № 7. – С. 96–99.

42. Влияние технологических факторов на характеристики брикетов из огнеупорных материалов при гидродинамическом прессовании / [Л. Н. Афанасьев, С. Г. Барай, О. В. Роман и др.]. // Огнеупоры. – 1983. – № 9. С. 5–9.

43. Волошин-Челпан Э. К. Определение оптимальных режимов вибрационного формования / Э. К. Волошин-Челпан, Г. Н. Петров // Тр. Всесоюз. научно-техн., конф. по металлокерамическим материалам и изделиям. – Ереван, 1973. – С. 105–108.

44. Іскович–Лотоцький Р. Д. Віброударна головка бурильної установки з гідроімпульсним приводом / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнарод-

ний збірник наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. Вип. 30. – С. 92–96.

45. Іскович–Лотоцький Р. Д. Застосування вібраційного гідроімпульсного привода в будівельних і дорожніх машинах / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук // Збірник наукових праць Харківської державної академії залізничного транспорту. – Харків, 2008. – № 88. – С. 48 – 54.

46. Гончаревич И. Ф. Теория вибрационной техники и технологии / И. Ф. Гончаревич, К. В. Фролов. – М.: Наука, 1981. – 320 с.

47. Горбатов А. В. Перспективы использования виброволновых методов обработки сырья в пищевой промышленности. / А. В. Горбатов, А. В. Гноевой, Ю. А. Мачихин. – М. – 1985. – 407 с.

48. Горский А. И. Расчет машин и механизмов автоматических линий литейного производства / А. И. Горский. – М. : Машиностроение, 1978. – 551 с.

49. Гидропривод сваепогружающих и грунтоуплотнящих машин / [М. Е. Иванов, И. Б. Матвеев, Р. Д. Искович-Дотоцкий и др.]. – М. : Машиностроение, 1977. – 174 с.

50. Джонс В. Д. Основы порошковой металлургии. Прессование и спекание / В. Д. Джонс ; пер. с англ. – М. : Мир, 1965. – 326 с.

51. Іскович–Лотоцький Р. Д. Підвищення ефективності розвантаження матеріалів під дією періодичних ударних імпульсів / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук // Вібрації в техніці і технологіях. – 2008. – №2(51). – С. 8 – 11.

52. Дородный Б. А. Исследования и разработки технологии изостатического прессования крупногабаритных огнеупорных изделий : автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.11. – Свердловск, 1978. – 21 с.

53. Дородный Б. А. Вибровакуумное уплотнение тонкодисперсных порошков и его влияние на гидростатическое прессование / Б. А. Дородный, Е. У. Дегтярева // Огнеупоры. – 1977. – № 8. – С. 32–38.

54. Живов Л. И. Кузнечно-штамповочное оборудование. Молоты. Ротационные машины. Импульсные штамповочные устройства / Л. И. Живов, А. Г. Овчинников. – Киев: Вища школа, 1972. – 279 с.

55. Зелінська О. В. Актуальні проблеми підвищення надійності та ефективності діагностування сільськогосподарської техніки / О. В. Зелінська, Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська // Збірник науко-

вих праць, серія «Галузеве машинобудування, будівництво» – Полтава. – 2009. – Випуск 3(25), Том 2. – С. 91–94.

56. Зелінська О.В. Математичні задачі моделювання для оптимізації структур та параметрів технологічних і інформаційних систем. / О. В. Зелінська // Матеріали II міжнародної науково-методичної конференції «Інноваційний розвиток: економіка, управління, інформаційні технології, право, освіта». – Вінниця, 2014. – С. 95–99.

57. Зелінська О. В. Методи діагностування вібраційних машин. / О. В. Зелінська // Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Технічні науки. – 2010. – Випуск № 5. – С. 23–27.

58. Зелінська О. В. Методи діагностування ресурсу роботи гідроімпульсного приводу вібропресової машини. / О. В. Зелінська // Сучасні вібраційні технології, машини, обладнання та динамічні процеси в них. – 2013. – <http://www.vibrokonf.vntu.edu.ua>.

59. Зелинская О. В. Оценка эффективности и надежности функционирования гидроимпульсных приводов. / О. В. Зелинская // Журнал актуальной научной информации. «Аспирант и соискатель». – Москва, 2013. – №6. – С. 150–155.

60. Іскович-Лотоцький Р. Д. Автоматизація процесу діагностування вібраційних машин з гідроімпульсним приводом / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Міжнародна наук. технічна конф. «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення». – Севастополь : Видавництво СевНТУ, 2009. – С. 203–205.

61. Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасний стан впровадження безвідходних та маловідходних технологій з використанням вібрацій / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Збірник наукових праць III Міжнародної науково-технічної конференції ТК-2014 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» – ЛНТУ, 2014. – С. 28–30.

62. Іскович-Лотоцький Р. Д. Підвищення ефективності функціонування вібропреса з гідроімпульсним приводом / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Всеукраїнський НТЖ «Вібрації в техніці та технологіях». – 2015. – № 2(78). – С. 75–79.

63. Иванов М. Е. Специальная аппаратура управления короткоходными возвратно-поступательными и вращательными перемещениями / М. Е. Иванов, Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Коц – М. : НИИМаш, 1982. – 52 с.

64. Иващенко В. В. Влияние инерционного нагружения на процесс вибрационного уплотнения порошковых материалов / В. В. Иващенко // Порошковая металлургия. – 1972. – № 5. – С. 18 – 21.
65. Иващенко В. В. Исследование некоторых параметров и особенностей вибрационного уплотнения порошковых материалов : дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : 0.171. – Киев, 1966. – 223 с.
66. Искович-Лотоцкий Р. Д. Разработка, теоретическое и экспериментальное исследование новой конструкции вибропресе-молота для прессования деталей из материала на основе карбида кремния: дис. канд. техн. наук: 05.03.05 / Искович-Лотоцкий Ростислав Дмитриевич – М.: 1974. – 213 с.
67. Искович-Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода навісного обладнання для зондування ґрунтів / Р. Д. Искович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Є. І. Івашко // «Вібрації в техніці та технологіях» XVI Міжнародна науково-технічна конференція, 26-27 жовтня 2017 р.: Збірник тез доповідей. – Вінниця, 2017. – С. 147-149.
68. Искович-Лотоцкий Р. Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. В. Матвеев, В. А. Крат. – Киев: Техніка, 1982. – 208 с.
69. Искович–Лотоцький Р.Д., Іванчук Я. В., Повстенюк В.І., Костюк Г. В., Данилюк О. М, Веселовська Н. Р. Установка для утилізації медичних відходів з відбором тепла та охолодження. Збірник наукових праць ВНАУ, Серія: Технічні науки. – м. Вінниця, 2011. – №7.– С. 98 – 103.
70. Полукарова З. М. Использование вибрационного уплотнения для повышения прочности прессовок / З. М. Полукарова, И. Г. Шаталова, Р. К. Юсупов, Е. Д. Щукин // Порошковая металлургия. – 1968. – № 6. – С. 54 – 56.
71. Пивоваров А. Д. Исследование и разработка технологии формования карбид-кремниевых капсул / А. Д. Пивоваров, В. М. Ям, Г. Е. Карась и др. // Огнеупоры. – 1978. – №4. – С. 10–13.
72. Искович-Лотоцький Р. Д. Автоматизований контроль якості виробів машинобудування / Р. Д. Искович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2008. – Випуск 4/2008(51), частина 2. – С. 155-158.
73. Искович-Лотоцький Р. Д. Спеціальні методи і технології контролю багатокординатного механообробного обладнання / Р. Д. Искович-

- Лотоцький, В. Б., Струтинський, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Промислова гідравліка і пневматика». – 2009 – №2(24). – С. 83–88.
74. Іскович-Лотоцький Р. Д. Управління ефективністю та надійністю технологічних процесів в гнучких інтегрованих виробничих системах / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Вісник НТУУ «Київський технічний інститут машинобудування». – 2009 – С. 266–270.
75. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – 338 с.
76. Іскович-Лотоцький Р. Д. Визначення робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів / Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов, Я. В. Іванчук, В. С. Любин // Промислова гідравліка і пневматика (Вінницький державний аграрний університет, Асоціація спеціалістів промислової гідравліки і пневматики). – 2012. – №4(38). – С. 57 – 65.
77. Іскович-Лотоцький Р. Д. Вібраційні та віброударні процеси та машини у ливарному виробництві : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, М. М. Вірник, Н. Р. Веселовська – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 198 с.
78. Жданович Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович – М. : Металлургия, 1969. – 184 с.
79. Канарчук В. Є. Надійність машин : підручник. / В. Є. Канарчук – К. : Либідь, 2003. – 424 с.
80. Кильчевский Н. А. Теория соударения твердых тел / Н. А. Кильчевский – Киев : Наукова думка, 1969. – 237 с.
81. Кононов И. В. Новые гидравлические кузнечно-прессовые машины и гидроприводы / И. В. Кононов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 7. – С. 26–28.
82. Корн. Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 831 с.
83. Кунин Н. Ф. Закономерности прессования порошков разных материалов / Н. Ф. Кунин, Б. Д. Юрченко // Порошковая металлургия. – 1964. – № 2. – С. 39 – 41.

84. Лисогор В. М. Алгоритмічна модель випадкового пошуку задач ідентифікації багатостадійного технологічного процесу. / В. М. Лисогор, С. В. Сорокун // Вісник Хмельницького університету. – 2009. – № 1. – С. 217–220.
85. Магнезиальные стаканы для скоростного разливания стали, изготовленные вибропрессованием / [В. М. Ям, В.В. Мирошниченко, Л. Я. Осипова и др.] // Огнеупоры. – 1978. – № 3. – С. 6–13.
86. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / [Г. А. Гулый, П. П. Малюшевский, Е. В. Кривицкий и др.]; под ред. Г. А. Гулого. – М. : Машиностроение, 1977. – 320 с.
87. Малюшевский П. П. Использование электрогидравлического эффекта в порошковой металлургии / П. П. Малюшевский, А. Б. Толстых // Порошковая металлургия. – 1979. – № 5. – С. 22–26.
88. Масленников И. Е. Разработка и исследование гидравлических прессов с пульсирующей нагрузкой для калибрования труб и профилей : автореф. дис. на соискателя степени канд. техн. наук : 05.04.04. / И.Е. Масленников – М., 1975. – 25 с.
89. Матвеев И. Б. Гидропривод машин ударного и вибрационного действия / И. Б. Матвеев – М. : Машиностроение, 1974. – 184 с.
90. Іскович–Лотоцький Р. Д. Математичне моделювання робочих процесів інерційного вібропрес–молота з електрогідравлічною системою керування гідроімпульсного привода для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів // Р.Д. Іскович–Лотоцький, В.П. Міськов, Я.В. Іванчук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2016, – №3(237). – С. 176 – 180.
91. Іскович–Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // «Вібрації в техніці та технологіях» XVI Міжнародна науково-технічна конференція, 26-27 жовтня 2017 р.: Збірник тез доповідей. – Вінниця, 2017. – С. 170-172..
92. Мудров В. И. Методы обработки измерений / В. И. Мудров, В. Л. Кушко – М. : Советское радио, 1976. – 192 с.
93. Муха И. М. Вибрационное прессование, твердосплавных порошков / И. М. Муха, М. Н. Довбишук, А. Л. Мороз // Технология и организация производства. – 1969. – № 3. – С. 83–85.

94. Об опыте изготовления погружных стаканов и стопор- моноблоков методом гидростатического прессования / В. Г. Сиваш, Е. Д. Посохова, Н. Т. Дырда и др. // Огнеупорные материалы для оптического стекловарения : сб. тр. Госуд. оптич. ин-та. – М., 1977. – С. 26–27.
95. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Г. А. Гулый, П. П. Малюшевский, Е. В. Кривицкий и др. ; под ред. Г. А. Гулого. – М. : Машиностроение, 1977. – 320 с.
96. Опытнo-промышленный образец вибропресса усилием 20 тс. / И. Б. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий, Р. Р. Обертюх и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1978. – № 5. – С. 34–37.
97. Паламарчук Ігор Павлович. Науково-технічні основи розроблення енергозберігаючих вібромашин механічної дії харчових і переробних виробництв : автореф. дис ... д-ра техн. наук : 05.18.12 / Ігор Павлович Паламарчук; В.о. Київ. нац. ун-т харч. технологій.– К. : Б. в., 2008. – 44 с.
98. Пановко Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко – М. : Наука, 1980. – 270 с.
99. Патент № 88882 Україна МПК (2014.01) G01M 13/00. Спосіб визначення ефективності функціонування гідроімпульсного приводу тривалої дії / Веселовська Н. Р, Зелінська О. В., Рубаненко О. О.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № U2013 09935: заявл. 09.08.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7.
100. Іскович–Лотоцький Р. Д. Розрахунок температурних полів в робочих зонах піролізної установки / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Міжвузівський збірник наукових праць "НАУКОВІ НОТАТКИ". – Луцьк, 2013. – Випуск 42. – С. 113 – 120.
101. Пат. 34261А Україна, МПК6 B28B 3/00. Спосіб вібропресування формувальних сумішей / Р. Д. Іскович-Лотоцький, М. М. Вірник, О. А. Рагозін, В. О. Пішенін ; заявл. 18.06.99 ; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 2. – 5 с.
102. Платонов Б. П. Пневматика или гидравлика / Б. П. Платонов // Литейное производство. – 1997. – № 3. – С. 11–12.
103. Попильский Р. Я. Прессование керамических порошков / Р. Я. Попильский, Ф. В. Кондрашов – М. : Металлургия, 1968. – 272 с.
104. Потураев В. Н. Исследование процесса вырубки на гидравличе-

ских прессах с применением вибраций / В. Н. Потураев, А. Ф. Миронюк // Кузнечно-штамповочное производство. – 1969. – № 11. – С. 21–22.

105. Потураев В. Н. Некоторые результаты исследования вибрационного уплотнения металлических порошков на вибропрессах / В. Н. Потураев, А. Ф. Миронюк, Н. Н. Пендраковский // Порошковая металлургия. – 1975. – № 12. – С. 23–27.

106. Принципы классификации процессов формования порошковых материалов / К. Н. Богоявленский, В. А. Кузнецов, К. К. Мартенс и др. // Порошковая металлургия. – 1985. – № 6. – С. 89–94.

107. Прищепионок Л. А. Исследование экспериментального образца пресса для вибрационной зачистки модели ИМ-61 / Л. А. Прищепионок, В. А. Мельник, А. Л. Рягузов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 9. – С. 27–28.

108. Производство огнеупоров полусухим способом. / [А. К. Карклит, А. П. Ларин, С. А. Лосев и др.] – М. : Металлургия, 1972. – 368 с.

109. Искович–Лотоцкий Р. Д. Установка для утилизации отходов / Р. Д. Искович–Лотоцкий, В.І. Повстенюк, О.М. Данилюк, Я. В. Иванчук // Международный промышленный журнал «Мир техники и технологий»–Харьков, 2007. – №12(73). – С. 36–37.

110. Радомысельский И. Д. Конструкционные порошковые материалы / И. Д. Радомысельский, Г. Г. Сердюк, Н. И. Щербань – Киев : Техніка, 1985. – 152 с.

111. Радомысельский И. Д. Производство и использование порошковых деталей в легкой промышленности / И. Д. Радомысельский, Д. С. Ясь, В. И. Павленко – Киев : Техніка, 1982. – 175 с.

112. Разработка и исследование вибрационного импульсного пресса для формообразования заготовок порошковой металлургии : отчет НИР / Винницкий политехнический институт. Руководитель И. Б. Матвеев. – № ГР76026910 ; Инв № Б491804. – Винница, 1976. – 122 с.: ил. – Отв. исполн. Р. Д. Искович-Лотоцкий.

113. Искович–Лотоцкий Р. Д. Моделювання робочих процесів гідропульсального привода з однокаскадним клапаном пульсатором [Текст] / Р. Д. Искович–Лотоцкий, Я. В. Иванчук, Я. П. Веселовський // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2017. – № 3(86). – С. 10–19.

114. Іскович–Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором [Текст] / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Вібрації в техніці та технологіях. – Вінниця, 2017. – № 3(86). – С.10–19.
115. Растригин Л. А. Введение в идентификацию объектов управления / Л. А. Растригин, Н. Е. Маджаров. – М.:Энергия, 1997. – 215с.
116. Ротштейн О. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі / О. П. Ротштейн – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1999. – 320 с.
117. Свойства порошков металлов, тугоплавких соединений и спеченных материалов : информационный справочник. – Киев : Наукова думка, 1978. – 184 с.
118. Іскович–Лотоцький Р. Д. Аналіз використання гідроімпульсних вібророзвантажувальних пристроїв на автомобільному транспорті // Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я.В. Іванчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011, – №6. – С. 228 – 231.
119. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов – М. : Машиностроение 1977. – 423 с.
120. Тябликов Ю. Е. Гидравлическое возбуждение переменных нагрузок и движений в технике механических испытаний : дис. докт. техн. наук : 01.02.06. / Тябликов Ю. Е. – М, 1974. -2 т.: Т1. – 287 с.; Т2. – 267 с.
121. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский – М. : Наука, 1966. – 724 с.
122. Урьев Н.Б. Физико-химическая механика в технологии дисперсных систем. –М.: Знание, 1975. – 65 с.
123. Файкин В. И. Исследование процесса вибрационного формирования пористых труб из порошковых материалов. : автореф. дис. на соискателя канд. техн. наук : спец. 0.171. / В.И. Файкин – М., 1970. – 21 с.
124. Файкин В. И. О влиянии пригруза при виброформовании изделий из порошковых материалов / В. И. Файкин, Г. Н. Петров, Э. К. Волошин-Челпан // Уч. записки Моск. ин-та тонкой хим. технол. – 1970. – № 2. – С. 202–207.
125. Іскович–Лотоцький Р. Д. Моделювання робочих процесів в піролізній установці для утилізації відходів / Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Східно–Європейський журнал пе-

редових технологій. – Харків, 2016. – Том 1, № 8(79). – С.11–20. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59419.

126. Севостьянов И. В. Теоретические исследования процессов потокового фильтрования влажных дисперсных сред в пищевой промышленности // И. В. Севостьянов, Я. В. Иванчук // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. Vol. 15, No 4 – 2013, – С. 90 – 96.

127. D. Hofman. Handbuch Messtechnik und Qualitätssicherung. Zweite stark bearbeitete Auflage. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1981. – 472 p.

128. Nelson D. B. Performance and methodology of a digital random vibration control system // “Institute of Environmental Sciences”, Annual technical meeting Proceedings, 1973. – P. 187-191.

129. Iskovich-Lototkiy R. D. Dynamics of vibration machines by hydroimpulsive drive / R. D. Iskovich-Lototkiy. – Poznan: Vibration in physical systems, 1996. – P. 1170-1173.

130. Iskovich-Lototkiy R. D. New hydraulic and pneumatic vibration exciters of technology machines / R. D. Iskovich-Lototkiy. – Poznan: Vibration in physical systems, 1998. – P. 818-812.

131. Iskovych–Lototsky R. D., Zelinska O. V., Ivanchuk Y. V., Veselovska N. R. Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials // Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. – 2017. – Vol. 1, № 1(85). – P. 9–17. doi: 10.15587/1729-4061.2017.59418.

132. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/>.

Наукове видання

**Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович
Оксана Владиславівна Зелінська
Іванчук Ярослав Володимирович**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ
ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ
МАТЕРІАЛІВ НА ВІБРОПРЕСОВОМУ ОБЛАДНАННІ З
ГІДРОІМПУЛЬСНИМ ПРИВОДОМ**

Монографія

Редактор

Оригінал-макет підготовлено Я. Іванчуком

Підписано до друку 29.09.11 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк.
Наклад 100 прим. Зам №

Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.