

УДК 621.9-1/-9
№ держреєстрації 0122U002657
Інв. № _____

Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, м. Суми, Україна

ПОГОДЖЕНО

Заступник Міністра з питань
європейської інтеграції

_____ Олексій ШКУРАТОВ

«___» _____ 2022 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник установи

_____ Василь КАРПУША

«___» _____ 2022 р.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

за договором М/34-2022 від 23.05.2022 р.

**«Удосконалення технологічної підготовки виробництва за рахунок
автоматизації процесу проектування верстатних пристроїв»
(остаточний)**

Науковий керівник НДР
д-р техн. наук, проф.

Віталій ІВАНОВ

Термін виконання: 23.05.2022 р.–31.12.2022 р.

2022

Рукопис закінчено 8 грудня 2022 р.

Результати роботи розглянуто науковою радою Сумського державного університету,
протокол від 9 грудня 2022 року № 6

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,
Провідний наук. співроб.,
д-р техн. наук

Віталій ІВАНОВ
(вступ, розділи 1–2,
висновки)

Відповідальний виконавець,
Наук. співроб.,
канд. техн. наук

Юлія ДЕНИСЕНКО
(підрозділи 1.3, 1.4)

Виконавці:

Старш. наук. співроб.,
д-р техн. наук

Іван ПАВЛЕНКО
(вступ, розділи 1–2,
висновки)

Молод. наук. співроб.

Віталій КОЛОС
(розділи 1–2)

Молод. наук. співроб.

Владислав АНДРУСИШИН
(підрозділи 2.2, 2.5)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 53 с., 15 рис., 3 табл., 24 джерела.

ВЕРСТАТНИЙ ПРИСТРІЙ, БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНЕ ВИРОБНИЦТВО, МЕХАНІЧНЕ ОБРОБЛЕННЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА, РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ, ТЕХНОЛОГІЧНА ПІДГОТОВКА ВИРОБНИЦТВА.

Об'єкт дослідження – процес проєктування верстатних пристроїв.

Мета роботи – розроблення науково-теоретичних основ оптимального вибору компонувань верстатних пристроїв на основі дотримання заданих вимог щодо точності, продуктивності, гнучкості та собівартості виробництва.

Методи дослідження. Під час виконання наукових досліджень, на теоретичному рівні були застосовані регресійні методи аналізу перевизначених множин, системи комп'ютерної алгебри, а також засоби машинного навчання, зокрема псевдоінверсійний підхід Пенроуза–Мура та штучні нейронні мережі прямого зв'язку. Аналіз одержаних результатів виконувався із застосуванням методів математичного аналізу. Оцінювання параметрів розроблених математичних моделей за результатами чисельних досліджень здійснювався шляхом визначення кореляційного моменту Пірсона, а також за допомогою методу найменших квадратів і квазілінійного регресійного аналізу.

У проєкті розроблено структурно-функціональну модель процесу проєктування верстатних пристроїв для багатокоординатного оброблення деталей типу кронштейни. Створено математичну модель автоматизованого вибору компонувань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей.

У результаті розширено класифікацію деталей типу кронштейни та формалізовано проєктні процедури раціонального вибору верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками.

ЗМІСТ

С.

Вступ	5
1 Розроблення структурно-функціональної моделі процесу проектування верстатних пристроїв для багатокоординатного оброблення деталей типу кронштейни	7
1.1 Розроблення контекстної діаграми структурно-функціональної моделі процесу проектування верстатних пристроїв за стандартом IDEF0	7
1.2 Визначення наборів вхідних і вихідних даних, масиву довідкової та керівної інформації.....	9
1.3 Визначення структурних етапів та виявлення функціональних та інформаційних зв'язків між ними	19
1.4 Висновки до розділу 1	22
2 Створення математичної моделі автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей.....	24
2.1 Розроблення алгоритму автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей	24
2.2 Розширення класифікації деталей типу кронштейни за конструкторсько-технологічними ознаками	29
2.3 Формалізація проектних процедур із застосуванням теорії множин та штучних нейронних мереж.....	32
2.4 Розроблення алгоритму програми автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей	45
2.5 Висновки до розділу 2.....	48
Висновки.....	50
Перелк джерел посилання.....	51

ВСТУП

Сучасне машинобудування характеризується підвищеними вимогами до якості і точності виготовлення деталей машин. Особливою складністю відрізняється галузь якісного і точного оброблення поверхонь деталей машин. Саме тому важливість проектування та виготовлення верстатних пристроїв є актуальним питанням технологічної підготовки виробництва, що впливає на показники продуктивності та гнучкості виробництва. Відповідно до сучасних тенденцій створення високоавтоматизованого гнучкого виробництва виникає необхідність у нових методологічних підходах щодо забезпечення параметрів якості та зниження собівартості машинобудівної продукції. Це є наслідком того, що верстатні пристрої є невід'ємною частиною замкненої технологічної системи «верстат – верстатний пристрій – різальний інструмент – заготовка». Вони призначені для точного базування і надійного закріплення заготовок під час оброблення на металорізальних верстатах.

Про важливість верстатних пристроїв свідчать такі дані: вони складають 70–80% від загального обсягу технологічного оснащення машинобудівних виробництв [1]; частка верстатних пристроїв складає 10–20% від загальної вартості виробничої системи [2]; 80–90% витрат часу на технологічну підготовку виробництва припадає на проектування і виготовлення верстатних пристроїв [1]; 40% бракованих деталей після механічного оброблення утворюється через недосконалість верстатних пристроїв [3]; 70% нових компонувань верстатних пристроїв є модифікацією існуючих [4].

Основною метою науково-дослідної роботи є розроблення науково-теоретичних основ оптимального вибору компонувань верстатних пристроїв на основі дотримання заданих вимог щодо точності, продуктивності, гнучкості та собівартості виробництва.

Для досягнення цієї мети, сформульовано основне завдання, яке полягає у розробленні структурно-функціональної моделі процесу проектування верстатних пристроїв для багатокоординатного оброблення деталей типу

кронштейни. З цією метою, на першому етапі має бути створена математична модель автоматизованого вибору компонок верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей.

1 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПРОЄКТУВАННЯ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ БАГАТОКООРДИНАТНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ КРОНШТЕЙНИ

1.1 Розроблення контекстної діаграми структурно-функціональної моделі процесу проєктування верстатних пристроїв за стандартом IDEF0

Проєктування верстатних пристроїв (ВП) є важливим та відповідальним етапом технологічної підготовки машинобудівного виробництва, що забезпечує високі показники ефективності механічного оброблення поверхонь деталей машин. Процес проєктування ВП є складним і трудомістким, що потребує не лише використання конструкторсько-технологічного досвіду інженера та застосування елементів його технічної творчості, а й виконання технологічних і інженерних розрахунків. Тому актуальним та своєчасним завданням є автоматизація процесів проєктування ВП, що засновані на попередніх знаннях із застосуванням сучасних методик технологічних і інженерних розрахунків.

Інтенсифікація технологічної підготовки виробництва є перспективним напрямком, реалізацію якого можливо здійснити шляхом розроблення та впровадження САFD-технологій, які дозволяють виконувати проєктування ВП та розробляти необхідну конструкторсько-технологічну документацію в автоматизованому режимі.

Основними завданнями САFD-систем для операцій механічного оброблення деталей є: вибір функціональних елементів із бази даних на основі ідентифікації поверхонь заготовки; синтез ВП із обраних функціональних елементів; аналіз компонування ВП за заданим(и) критерієм(ями); розроблення конструкторської документації на ВП.

На етапі розроблення інформаційної системи важливим завданням є ідентифікація процесів, що потребують автоматизації. Аналіз мов моделювання процесів обґрунтовано засвідчив, що для заданого завдання

найдоцільніше використовувати методологію функціонального моделювання і графічного опису процесів IDEF0.

При структурно-функціональному моделюванні систему розглядають як сукупність взаємодіючих етапів або функцій. Аналіз функцій системи здійснюється незалежно від об'єктів, якими вони можуть оперувати. Такий підхід дозволяє точно моделювати логіку процесів проєктування та їх взаємодію [5].

При створенні нової структурно-функціональної моделі розробляється контекстна діаграма процесу проєктування ВП. Її завдання – описати процес проєктування ВП у найбільш узагальненому вигляді (рис. 1.1).

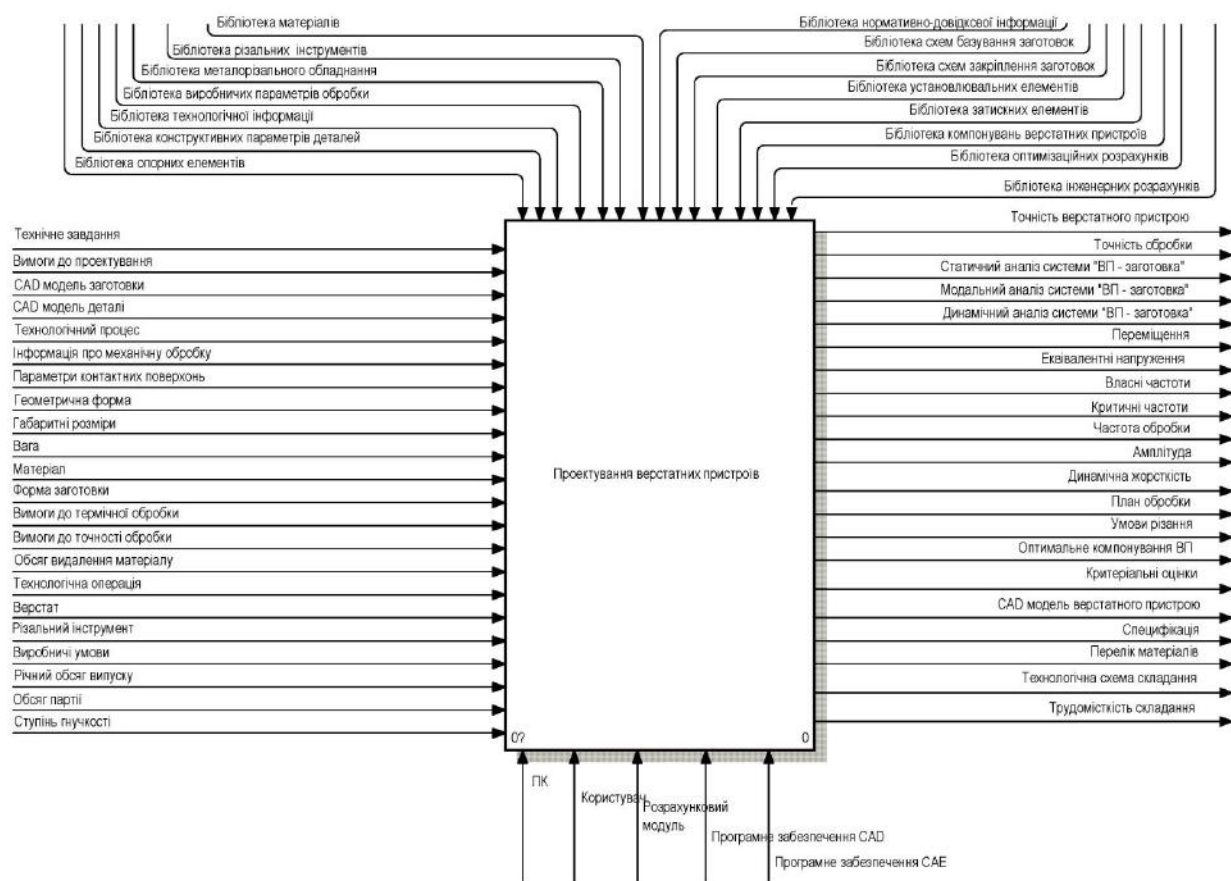


Рисунок 1.1 – Контекстна діаграма процесу проєктування верстатних пристроїв

Під час процесу проєктування ВП необхідно опрацювати великий обсяг інформації, як постійної (нормативна та керівна), так і змінної. Нормативна інформація (наприклад, державні стандарти, інженерні довідкові дані,

каталоги обладнання та різального інструмента, рекомендації щодо призначення режимів різання тощо) та керівна інформація (накопичені знання інженера-конструктора, методики та алгоритми, що дозволяють ефективно керувати даними під час процесу проектування ВП) забезпечують комплексний аналіз та виконання певних технологічних та інженерних розрахунків. Змінною є інформація, яка піддається змінам при кожній новій проєктній задачі та класифікується на вхідну (завдання на проєктування), проміжну (генерується у процесі роботи і використовується при взаємодії модулів системи) та вихідну (результати проєктування).

1.2 Визначення наборів вхідних і вихідних даних, масиву довідкової та керівної інформації

Найбільш відповідальним етапом є формування наборів вхідних і вихідних даних, масиву довідкової та керівної інформації, що дозволяє обґрунтовано реалізовувати проєктні процедури під час автоматизованого проєктування ВП.

У процесі експлуатації на ВП чинить вплив зовнішнє середовище. Зокрема, об'єкт оброблення, що закріплений у ВП, різальний інструмент, що виконує формоутворення поверхонь, металорізальний верстат, на якому встановлений ВП, та оператор, який обслуговує дане робоче місце. Це обумовлює певні обмеження, що безпосередньо впливають на структуру компонування ВП і процес проєктування зокрема.

Використання ВП розширює технологічні можливості металорізальних верстатів, підвищують продуктивність виготовлення продукції та вдосконалюють умови праці робітника. Проєктування ВП залежить від: об'єкта оброблення; верстата; різального інструмента; технологічних вимог; виробничих умов; експлуатаційних характеристик; економічних характеристик.

До характеристик об'єкту оброблення відноситься: форма, габаритні розміри, вага, матеріал, жорсткість, параметри оброблюваних та функціональних поверхонь.

Деталі в машинобудуванні поділяються на ряд класів за подібністю технологічних процесів механічного оброблення, схем базування, однотипності поверхонь, що приймаються за чистові та чорнові технологічні поверхні.

У автомобільному машинобудуванні широко застосування набули деталі складної форми, до яких належать важелі, кронштейни, вилки, шатуни, кулісні, тягові та інші. Зазначені деталі являють собою сукупність поверхонь, розташованих у різних площинах під різними кутами одна до іншої. Незважаючи на складну просторову геометричну форму зазначених деталей, їх елементарні поверхні є простими (отвори, пази, уступи, площини, тощо). Просторове розташування поверхонь призводить до складності вибору схем базування та закріплення заготовки, недостатньої інструментальної доступності, неможливості забезпечити багатокординатне оброблення деталей навіть на сучасних обробних центрах із ЧПК.

Для обґрунтованого аналізу параметрів, що чинять вплив на процес проєктування ВП, застосовано діаграму Ішикави, яка є одним із основних інструментів вимірювання, оцінювання, контролю та покращення якості виробничих процесів [6]. За допомогою діаграми Ішикави визначені найбільш суттєві причинно-наслідкові взаємозв'язки між параметрами та конструкцією ВП під час процесу проєктування (рис. 1.2).

Геометрична форма деталі значною мірою впливає як на технологію її виготовлення, так і на подальше оброблення. Від геометричної форми деталі залежить схема базування, вид оброблення, тип обладнання, вибір різального інструменту, режими різання, установлювальні та затискні елементи.

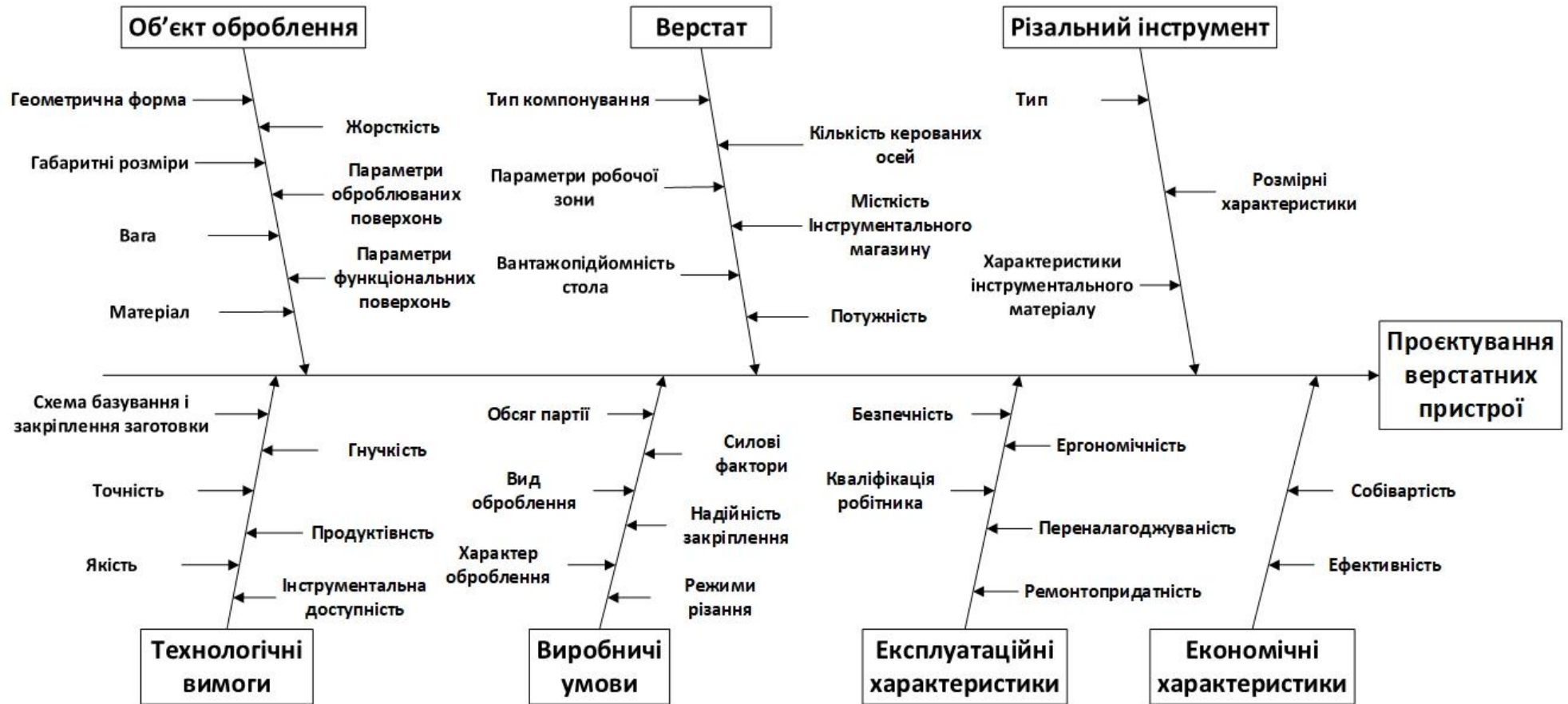


Рисунок 1.2 – Причинно-наслідкова діаграма Ішикави

Розміри деталі визначають конструкцію ВП, при якій можливо її закріпити та обробити відповідно до заданих умов. Від ваги оброблюваної деталі залежить конструкція ВП, схеми базування та закріплення, вантажопідйомність. Вага оброблюваної деталі може впливати на конструктивні особливості ВП і на економічні показники проєктування. Під час оброблення важких деталей необхідно використовувати відповідні елементи кріплення, оскільки важливим є забезпечити фіксацію та нерухомість заготовки, що впливає на вагу верстатного пристрою, а, отже, більші матеріальні витрати. Під жорсткістю оброблюваної деталі розуміють її здатність зберігати свою форму при навантаженні. Зміна форми деталі внаслідок дії навантаження призводить до зміни характеру спряження між іншими деталями, що може викликати зменшення міцності або збільшення зношування. Тому критерій жорсткості деталі є важливим під час проєктування ВП [7]. Параметри функціональних та базових поверхонь деталі накладають вимоги та обмеження щодо використання тих або інших елементів ВП для базування та закріплення заготовки в необхідному для оброблення положенні.

Сучасні металорізальні верстати мають широкі технологічні можливості, що дозволяють виконувати різні види оброблення з використанням різноманітних інструментів. Вони оснащуються інструментальними магазинами та пристроями для автоматичної зміни інструменту, що суттєво підвищує їх продуктивність. Металорізальні верстати свердлильно-фрезерно-розточувальної групи характеризуються габаритними розмірами робочого стола, розміром робочого простору, вантажопідйомністю, частотою обертання шпинделя, інструментальним магазином, кількістю керованих осей.

Габаритні розміри робочого стола верстата визначають максимальні габаритні розміри ВП при механічному обробленні.

Під розміром робочого простору верстата розуміють простір від поверхні робочого стола верстата до торця шпинделя (для верстатів

вертикального компонування) або до осі шпинделя (для верстатів горизонтального компонування). Для верстатів вертикального виконання даний параметр відіграє важливу роль та вказує на максимальні розміри заготовок, які можуть бути встановлені на верстаті. При цьому слід пам'ятати про розміри різального інструменту, який встановлюється у шпиндель верстата та затискні елементи верстатного пристрою, які повинні прагнути до мінімальних значень за висотою.

Вантажопідйомність стола верстата залежить від конструкції верстата, маси ВП і об'єкту оброблення, а також напрямку дії сил під час оброблення. Вагу ВП намагаються мінімізувати за умови збереження достатньої жорсткості та забезпечення динамічної стійкості, що дозволить більш ефективно використовувати технологічні можливості верстата. Більше значення вантажопідйомності свідчить про можливість інтенсифікації процесів оброблення.

Кількість керованих осей – це важливий параметр, що визначає технологічні можливості металорізального обладнання, та може коливатися від однієї осі (вертикально-свердлильний верстат) до п'яти (обробний центр). Продуктивність багатоцільових верстатів порівняно з верстатами з ЧПК підтверджується забезпеченням високої точності оброблення поверхонь та скороченням витрат часу через відсутність переустановлень. Беззаперечним фактором також є можливість оброблення поверхонь, що неможливе на 3-и координатних верстатах. Це суттєво впливає на конфігурацію ВП.

Особливістю сучасних багатоцільових верстатів є високошвидкісне оброблення поверхонь деталей машин із частотою обертання шпинделя в межах 20–40 тис. об/хв. Це обумовлює додаткові вимоги щодо проєктування ВП, зокрема забезпечення вібростійкості та протидії крутному моменту, що виникає під час механічного оброблення, а отже, на пряму впливає на якість та продуктивність оброблення поверхонь деталей [8].

Для комплексного оброблення декількох поверхонь деталі необхідно використовувати різні інструменти. Для механічного оброблення деталей

складної форми застосовуються інструментальні магазини з кількістю до 100 інструментів і більше. Формування комплекту різальних інструментів в інструментальному магазині верстата залежить від конструкторсько-технологічних особливостей оброблення деталей.

Різальний інструмент характеризується типом, розміром та інструментальним матеріалом. Різальні інструменти відіграють важливу роль у підвищенні продуктивності виготовлення та якості продукції. Інструмент повинен володіти наступними основними характеристиками: твердість; в'язкість; зносостійкість; ударостійкість [9].

Під час проєктування ВП необхідно враховувати вид оброблення, призначений тип та розмірні характеристики різального інструменту, що забезпечують вільний рух у зоні різання при обробленні заданих поверхонь заготовки. Характеристики інструментального матеріалу та силові фактори інструменту безпосередньо впливають на режими різання, тому конструкція ВП повинна враховувати сили, які діятимуть на систему «ВП – заготовка», для надійного закріплення при відповідних режимах різання.

Вибір технологічних баз важливий елемент при проєктуванні ВП. Саме цей пункт впливає на подальшу якість виготовлення та точність оброблюваних поверхонь. Від вибору схеми базування та закріплення заготовки залежить вибір/компонування функціональних елементів (установлювальні, затискні) та конфігурація компонування ВП в цілому.

Точність оброблення означає ступінь відповідності номінального і фактичного значень розмірів, форми, взаємного розташування та шорсткості конкретних поверхонь. Однак у більшості випадків наголос робиться на точність розмірів, тоді як недостатньо уваги приділяється точності взаємного розташування, що також впливає на процес складання та подальшу експлуатацію виробу. Точність взаємного розташування оброблюваних поверхонь залежить від точності верстата, положення деталі відносно різального інструменту та елементів верстата, а також динамічних характеристик, що забезпечується ВП [10,11].

Знос установлювальних елементів, пружні та температурні деформації, що виникають під час механічного оброблення, впливають на точність оброблення поверхонь деталей. Під точністю ВП розуміється його здатність надавати заготовці певне положення і зберігати це положення під час оброблення [12].

В умовах багатомономенклатурного виробництва гнучкість є одним із найважливіших показників, що характеризують ефективність використання ВП для оброблення широкої номенклатури деталей [13]. Гнучкість – здатність ВП переналагоджувати функціональні елементи в межах заданих технічних характеристик для оброблення визначеної номенклатури оброблюваних деталей. Основним критерієм гнучкості є ступінь гнучкості виробничої системи.

Підвищення продуктивності праці і поліпшення якості продукції – найважливіші завдання машинобудування. Одним із ефективних шляхів удосконалення виробництва є підвищення оснащеності виробничих процесів прогресивною механізованою й автоматизованою технологічною оснасткою [14]. ВП, спроектований відповідно до виробничих вимог, є ефективним засобом підвищення продуктивності праці і якості виробів, зниження собівартості, полегшення праці робітників і підвищення безпеки праці.

Компонування ВП залежить від типу виробництва та обсягу партії. Під типом виробництва слід розуміти масштаби виробництва. Від обсягу партії залежить ступінь автоматизації ВП.

Від виду механічного оброблення залежить схема базування та закріплення, розташування та кількість затискних елементів для забезпечення доступності інструменту. Конструкція ВП повинна забезпечувати надійне закріплення заготовки при екстремальних умовах механічного оброблення, мінімальні витрати часу на установлення і зняття деталі. Затискні елементи забезпечують надійність положення заготовки у процесі оброблення на верстаті [15]. Мінімізація деформації заготовки під час оброблення через сили затиску та різання відіграє важливе значення [16]. При деформації в

місцях закріплення деталь не буде відповідати параметрам точності та якості. Ненадійне закріплення при обробленні призводить до пошкодження оброблюваної деталі, різального інструменту, ВП, верстату, життя та здоров'я оператора.

Техніка безпеки охоплює комплекс технічних пристроїв та правил, що забезпечують нормальну життєдіяльність людини у процесі праці та виключають виробничий травматизм. Зовнішні елементи конструкцій ВП не повинні мати гострих кутів, кромки та інших поверхонь з нерівностями, що становлять небезпеку, якщо їх наявність не визначається функціональним призначенням. Радіуси заокруглення та розміри фасок зовнішніх поверхонь повинні бути не менше 1 мм, якщо вони не обумовлені особливістю конструкції. Елементи верстатних пристроїв, що виступають за габарит стола верстата, не повинні перешкоджати роботі верстата, обмежувати доступ до органів керування, створювати небезпеку роботі верстатника. Верстатний пристрій повинен забезпечувати надійне та зручне закріплення з верстатом та змінними налагоджувальними елементами. Спосіб закріплення повинен виключати можливість послаблення кріплення та зміщення пристрою або його змінних налагоджувальних елементів у процесі експлуатації. У конструкції верстатного пристрою повинна бути передбачена можливість змащування всіх поверхонь, що труться, за допомогою мастильних отворів, каналів згідно з графіком/планом.

Кваліфікація працівників також впливає на ефективність використання ВП, оскільки досвід і практичні навички, необхідні для виконання робіт, є вирішальними при налагоджуванні та експлуатації ВП, установленні/знятті деталі, що впливає на продуктивність виконання технологічних операцій.

Конструкція ВП повинна відповідати багатьом вимогам, таким як зручність використання, ергономічність, безпека, швидкодія, вимагати мінімальні витрати на його виготовлення та ремонт. До ергономічних показників відносяться: зручність установлення та зняття деталі; зручність

базування ВП на столі верстата; легкість очищення від стружки та бруду; відсутність знімних деталей.

У сучасних технологічних процесах виробництва витрати на виготовлення і експлуатацію технологічної оснастки складають до 20% собівартості продукції. Найбільшу частку серед технологічної оснастки складають ВП. Кількість ВП постійно збільшується, що значно впливає на вартість і терміни підготовки виробництва, а, отже, виробництво потребує розроблення раціональної конструкції ВП, економічного обґрунтування, зниження металомісткості.

Ефективність використання ВП залежить від технологічності конструкції, оптимального співвідношення експлуатаційних і ремонтних витрат. Системи гнучких верстатних пристроїв найбільш ефективно використовувати на верстатах із ЧПК. Доведено, що застосування гнучких ВП на верстатах із ЧПК в багатомноменклатурному виробництві є ефективним, забезпечуючи в одному ВП оброблення деталей різних типорозмірів. Це сприяє скороченню кількості ВП на підприємстві, а отже, забезпечує скорочення витрат на проектування, виготовлення та експлуатацію.

Вибір матеріалу для виготовлення функціональних елементів ВП є важливим на стадії технологічної підготовки виробництва. При виборі матеріалу потрібно враховувати наступні фактори:

а) експлуатаційний – властивості матеріалу повинні відповідати умовам роботи деталі в машині (зносостійкість, антикорозійна стійкість, теплостійкість тощо);

б) технологічний – властивості матеріалу повинні відповідати способу виготовлення деталі і забезпечувати мінімальну трудомісткість виготовлення (ливарні властивості, оброблення різанням, ковкість);

в) економічний – матеріал повинен бути вигідним з врахуванням усіх витрат, пов'язаних із вартістю матеріалу, витрат на виготовлення та експлуатацію машини.

Механічні властивості визначаються шляхом аналітичних розрахунків міцності, жорсткості, стійкості тощо. Ці етапи дозволяють прийняти рішення щодо вибору необхідного матеріалу.

Для деталей, що працюють у важких умовах високотехнологічних галузей промисловості, обов'язковим є перевірка механічних властивостей вибраних матеріалів, що здійснюється експериментальними випробуваннями дослідних зразків. Це пояснюється тим, що навіть для широко використовуваних металів і сплавів їх фізико-механічні властивості можуть істотно відрізнятися залежності від постачальника, наявності домішок, режимів термічного оброблення та інших факторів. Запропоновано методологію автоматизованого вибору матеріалів (рис. 1.3), що дозволяє розробити автоматизовану базу даних відповідно до стратегії Industry 4.0 з подальшим накопиченням даних з метою їх аналізу та реалізувати віддалений доступ до баз даних матеріалів, що особливо важливо при автоматизації процесів проектування та технологічної підготовки виробництва [17].

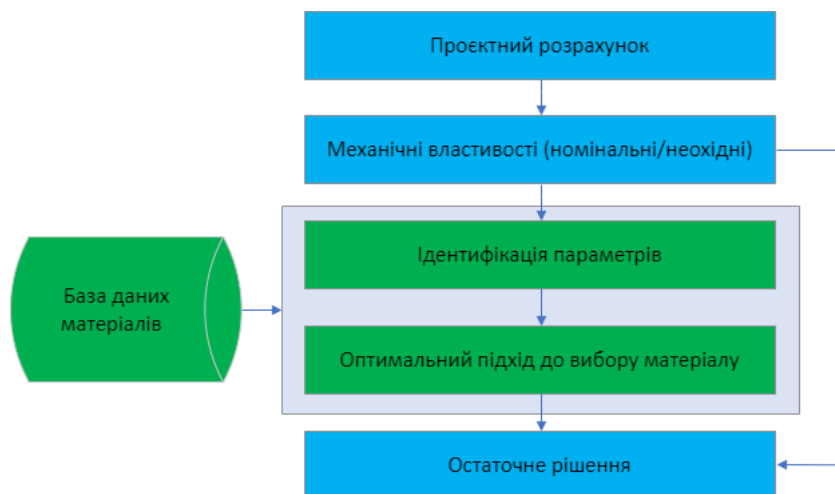


Рисунок 1.3 – Методологія автоматизованого вибору матеріалів

Вибір різального інструменту для певної технологічної операції означає визначення для кожного з переходів типу і типорозміру інструмента, а також матеріалу і геометричних параметрів його різальної частини. Під час вибору різальних інструментів враховують такі фактори: тип виробництва; спосіб

оброблення; тип верстата; конфігурацію і розміри оброблюваної заготовки; форму і розміри оброблюваної поверхні; матеріал заготовки; вимоги до точності і шорсткості обробленої поверхні.

1.3 Визначення структурних етапів та виявлення функціональних та інформаційних зв'язків між ними

Декомпозиція процесу проектування ВП відображає структурні етапи комплексного підходу до проектування ВП (рис. 1.4), які поділяються на: технологічний аналіз об'єкту оброблення; синтез та оптимізація компонувань ВП; інженерно-виробничий аналіз системи «ВП – заготовка».

Технологічний аналіз об'єкту оброблення призначений для проблемно-орієнтованого вивчення конструкторсько-технологічних особливостей заготовки. Вихідними даними виступає 3D-модель оброблюваної заготовки у стані, що поступає на виконання технологічної операції.

На даному етапі ідентифікують функціональні поверхні заготовки, які класифікують на оброблювані, базові, поверхні під притискачі. До оброблюваних поверхонь відносять поверхні, які потребують механічного оброблення на заданій технологічній операції. Кількість оброблюваних поверхонь залежить від технічного завдання. До базових поверхонь (як правило, це сукупність поверхонь) відносять поверхні, які визначають положення заготовки у тривимірному просторі, позбавляючи заготовку певної кількості ступенів вільності (максимально шість – три переміщення, три обертання). До поверхонь під притискачі (одна або кілька) відносять поверхні, до яких прикладають силу закріплення для забезпечення незмінного положення заготовки у процесі механічного оброблення поверхонь.

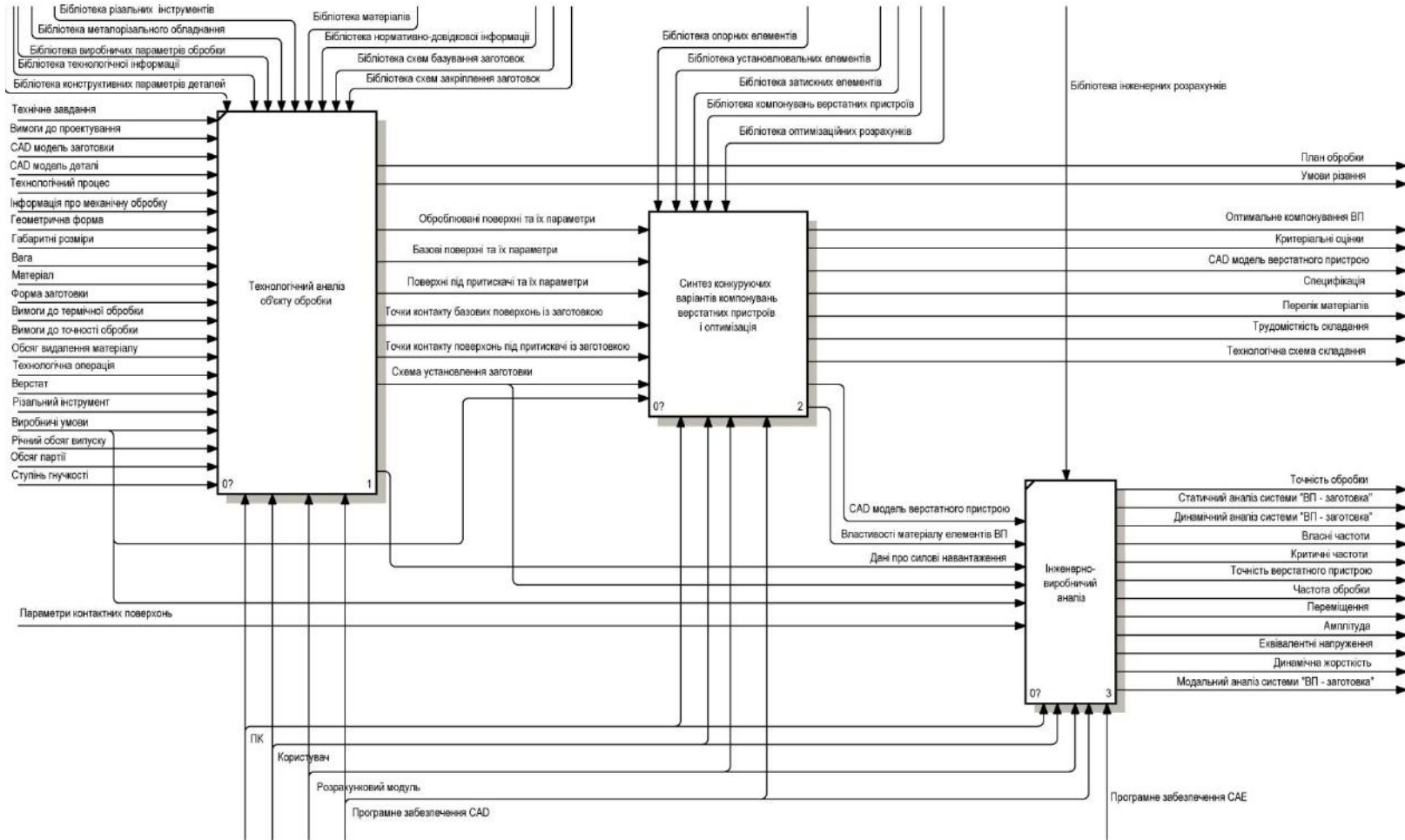


Рисунок 1.4 – Декомпозиція процесу проектування верстатних пристроїв

Для вищезазначених поверхонь з цифрової моделі заготовки необхідно отримати таку інформацію: геометрію (форму) поверхонь; просторове розташування поверхонь відносно інших поверхонь; розмірні характеристики поверхонь (довжина, ширина, висота, діаметр); поле допуску; шорсткість; марку матеріалу; твердість матеріалу заготовки; вид термічного оброблення; інші технічні вимоги.

На основі отриманої інформації про оброблювані поверхні, формується план оброблення поверхонь. На даному етапі визначаються: принципова схема оброблення поверхонь; режими різання; сила різання; необхідна потужність верстата для виконання оброблення.

На основі базових поверхонь приймається рішення щодо орієнтації заготовки у просторі під час механічного оброблення. Для цього необхідно визначити теоретичну схему базування з відповідної прикладної бібліотеки. Обов'язковим етапом є визначення кількості та координат точок контакту заготовки з установлювальними елементами ВП.

Поверхні під притискачі обираються таким чином, щоб після прикладання затискної сили забезпечити незмінність положення заготовки під час процесу формоутворення. Схема закріплення обирається зі списку типових схем закріплення, що міститься у відповідній прикладній бібліотеці бази даних. Кількість точок контакту між заготовкою і затискними елементами ВП визначається на основі основних положень проектування ВП.

Схема установлення та оброблення заготовки формується, використовуючи попередньо отримані дані з плану оброблення, схем базування і закріплення заготовки. При цьому визначаються величини та напрямки дії сили різання і сили закріплення.

Етап синтезу та оптимізації компоновки ВП складається з двох підетапів. Вибір установлювальних і затискних елементів здійснюється на основі розроблених правил із урахуванням попередньо отриманих даних про базові поверхні та поверхні під притискачі. Вибір опорних елементів здебільшого визначається габаритними розмірами заготовки, а також

обраним схемам базування та закріплення заготовки. Таким чином, формуються сукупності конкуруючих варіантів установлювальних, затискних і опорних елементів. Далі на їх основі та з урахуванням раніше створених ВП, що містяться у бібліотеці компоувань ВП, відбувається формування конкуруючих варіантів компоувань ВП за розробленим алгоритмом. Вибір оптимального компоування ВП для заданих виробничих умов здійснюється на основі багатокритеріальної оптимізації. Розроблена математична модель дозволяє згенерувати перелік конкуруючих варіантів компоувань ВП і виконати розрахунок чисельних параметрів за кожним критерієм оптимальності. Результатом оптимізаційної задачі є оптимальне компоування ВП із визначеними критеріальними оцінками.

Виконання інженерно-виробничого аналізу дозволяє оцінити параметри спроектованого компоування ВП. Вибір процедур та їх черговість виконання залежать від виробничих умов та розробленого технічного завдання на проектування ВП. Дослідження системи «ВП – заготовка» виконується на основі розроблених методики дослідження точності оброблення деталей, методики дослідження стійкості рівноважного стану системи, методики дослідження напружено-деформованого стану, методики проведення модального аналізу, методики проведення гармонічного аналізу.

1.4 Висновки до розділу 1

Таким чином, формування наборів вхідних і вихідних даних, а також масиву довідкової та керівної інформації дозволило обґрунтовано реалізовувати проєктні процедури під час автоматизованого проєктування ВП. За допомогою комплексного аналізу відповідних характеристик, розроблено нову структурно-функціональну модель, а також відповідну контекстну діаграму та декомпозицію процесу проєктування ВП.

У результаті складено причинно-наслідкову діаграму Ішикави, за допомогою якої визначено найбільш суттєві причинно-наслідкові взаємозв'язки між параметрами та конструкцією ВП під час їх проєктування.

Також розроблено комплексний підхід щодо раціонального вибору матеріалу, що ґрунтується на застосуванні регресійного аналізу і методів теорії ймовірностей. Зокрема, запропоновано матричні співвідношення для розв'язання прямої та оберненої задач раціонального вибору матеріалу на основі даних щодо фазового складу та фізико-механічних властивостей.

Після нормалізації основних формалізованих показників вибору матеріалу, одержано аналітичні залежності щодо оцінювання фазового складу матеріалу на основі необхідних фізико-механічних характеристик.

У цілому, розроблений комплексний науково-методологічний підхід спрямовано на впровадження процедури автоматизованого вибору компонувань ВП для закріплення деталей складної форми, а також раціонального вибору відповідного матеріалу під час проєктування ВП у розумному виробництві.

2 СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИБОРУ КОМПОНУВАНЬ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОЗНАКАМИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ

2.1 Розроблення алгоритму автоматизованого вибору компонентів верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей

Сучасне машинобудівне виробництво характеризується підвищеними вимогами до якості та точності виготовлення деталей. Одним із ключових напрямків є оброблення деталей складної форми з різних матеріалів відповідно до вимог якості та точності. Саме тому важливість процесу проектування ВП є актуальним завданням технологічної підготовки виробництва, що значно впливає на його продуктивність та гнучкість.

Деталі типу кронштейни працюють в різних середовищах: при високих і низьких температурах, різній вологості, при високому рівні запиленості та забрудненості навколишнього середовища.

Технічні вимоги до деталей типу кронштейни наведені в більшості літературних джерел, зокрема в [18]. Традиційно отвори використовуються як основні та допоміжні опорні точки із точністю IT6–IT11. Величини відхилень міжосьових відстаней не перевищує 0,05–0,50 мм. Вісі отворів повинні бути паралельні або перпендикулярні з допустимими відхиленнями від 0,02:100 до 0,10:100. Торці та отвори повинні бути перпендикулярними до осей з величинами допустимих відхилень від 0,1:100 до 0,3:100, а шорсткість поверхні знаходиться у діапазоні значень $R_a = 0,32\text{--}1,25$ мкм. Крім того, плоскі поверхні деталей типу кронштейни повинні бути перпендикулярні до осей отворів з допусками від 0,05:100 до 0,10:100, шорсткість їх поверхонь становить $R_a = 0,63\text{--}2,50$ мкм. Шорсткість відповідає $R_a = 0,63\text{--}2,50$ мкм, а відхилення від їх форми – у межах допуску на діаметр (переважно 20–60%). Твердість матеріалу деталей типу

кронштейни повинна бути HRC 40–55, що забезпечує заданий термін служби деталей.

Запропонована класифікація деталей типу кронштейни [19] дозволяє описати їх за конструкторсько-технологічними ознаками. У результаті визначено чотири конструктивні та сім технологічних особливостей. Це важливий етап у переході від конфігурації деталі до створення схеми базування деталі у ВП у системі автоматизованого проєктування. Загальний підхід наведено на рисунку 2.1.

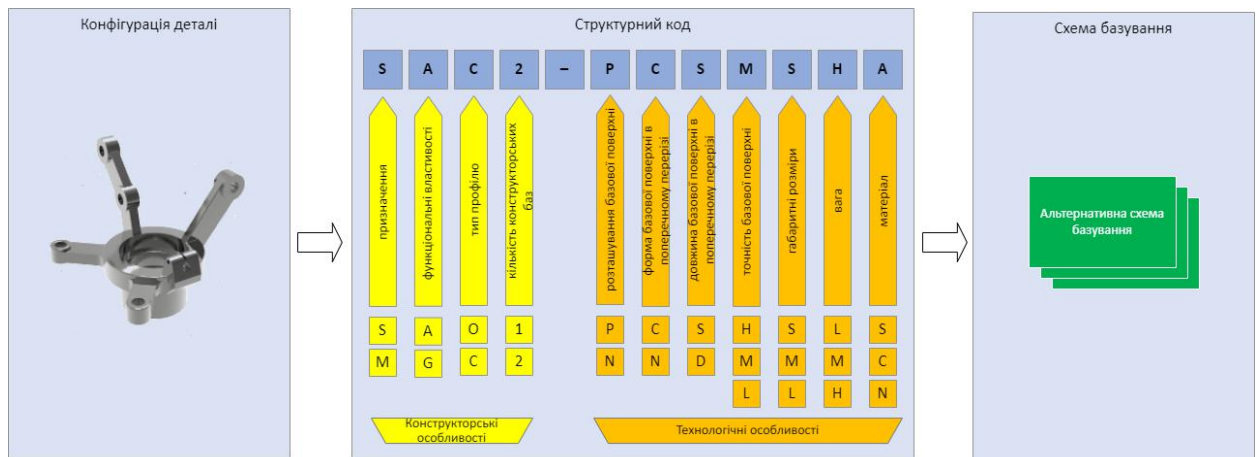


Рисунок 2.1 – Графічне представлення методології «від конфігурації деталі до схеми базування»

Для кожного типового представника деталей типу кронштейни можна запропонувати декілька теоретичних схем базування. Вибір схеми базування залежить від геометричної форми та конструктивних особливостей деталі (наявність площин, виступів, отворів тощо), точності, розмірів, форми та просторового розташування поверхонь одна відносно іншої, якості, шорсткості поверхні та жорсткості (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Можливі способи реалізації теоретичних схем базування

Схеми базування	Спосіб реалізації
1	2
1 – за двома зовнішніми циліндричними поверхнями та площиною	1.1 Самоцентруючі призми (ПНБ) + опори (ОБ)
	1.2 Призма (ПНБ) + бічна опора (ОБ)
	1.3 Призма (НБ) + призма (НБ) + бічна опора (ОБ)
2 – за зовнішньою циліндричною поверхнею та однією(двома) площиною(ами)	2.1 Самоцентруючі призми (ПНБ) + опори (ОБ)
	2.2 Призма (ПНБ) + бічна опора (ОБ)
	2.3 Призма (НБ) + призма (НБ) + бічна опора (ОБ)
	2.4 Пластина (УБ) + призма (НБ) + бічна опора (ОБ)
3 – за зовнішньою циліндричною поверхнею та отвором	3.1 Самоцентруючі призми (ПНБ) + опори (ОБ)
	3.2 Призма (ПНБ) + опора (ОБ)
	3.3 Призма (УБ) + призма (НБ) + опора (ОБ)
4 – за трьома площинами	4.1 Пластина (УБ) + пластина (НБ) + опора (ОБ)
	4.2 Опора (УБ) + опора (НБ) + опора (ОБ)
	4.3 Пластини (УБ) + опори (НБ) + опора (ОБ)

Продовження таблиці 2.1

1	2
	4.4 Пластина та опори (УБ) + пластина (НБ) + опора (ОБ)
	4.5 Пластина та опора (УБ) + пластина (НБ) + опора (ОБ)
5 – за двома площинами та отвором	5.1 Пластини (УБ) + циліндричний палець (НБ) + опора (ОБ)
	5.2 Опори (УБ) + циліндричний палець (НБ) + опора (ОБ)
	5.3 Пластини (УБ) + розтискний самоцентруючий палець (НБ) + опора (ОБ)
	5.4 Опори (УБ) + розтискний самоцентруючий палець (НБ) + опора (ОБ)
6 – за площиною та двома отворами	6.1 Пластини (УБ) + циліндричний палець (НБ) + циліндричний палець (ОБ)
	6.2 Пластини (УБ) + циліндричний палець (НБ) + зрізаний палець (ОБ)
	6.3 Пластини (УБ) + конічний висувний палець (НБ) + зрізаний палець (ОБ)
	6.4 Пластини (УБ) + розтискний самоцентруючий палець (НБ) + зрізаний палець (ОБ)

На практиці кількість способів реалізації схем базування може бути розширена відповідно до конкретних технічних вимог і умов роботи. Після

визначення найбільш прийнятної схеми базування формуються вимоги до набору установлювальних елементів (наприклад, діапазон розмірів, тип робочої поверхні тощо). При встановленні цих вимог також враховуються геометрична форма, габаритні розміри і якість розташування поверхонь.

Математична модель для раціонального вибору схеми базування базується на рівнянні:

$$[\Psi] = [\Xi][W], \quad (2.1)$$

де $[\Psi]$ – матриця схеми базування; $[\Xi]$ – матриця конструктивно-технологічних особливостей, у тому числі матеріалів; $[W]$ – матриця перетворення.

Матриця $[\Psi]$ схеми базування є прямокутною розмірністю $N \times m$, де N – загальна кількість розглянутих деталей; m – загальна кількість схем базування.

Матриця $[\Xi]$ конструкторсько-технологічних ознак також є прямокутною, розмірністю $N \times n$, де n – загальна кількість конструкторсько-технологічних особливостей.

Рівняння (2.1) можна застосувати до прямокутної матриці $[W]$ з розмірністю $n \times m$. Його елементи визначаються на основі попереднього практичного досвіду проектування m різноманітних схем базування N типових деталей. Відповідний вираз для матриці $[W]$ можна записати відповідно до наступного рівняння регресії:

$$[W] = [\Xi]^T [\Xi]^{-1} [\Xi]^T [\Psi], \quad (2.2)$$

Крім того, цей вираз надійний у випадку, якщо загальна кількість розглянутих деталей перевищує загальну кількість обраних схем базування ($N \times m$).

Для уніфікації числового підходу доцільно використовувати нормалізовані значення для всіх елементів матриць $[\Psi]$. Це означає, що кожен елемент $\Psi_{N,m}$ має значення від 0 до 1. Наприклад, $\Psi_{N,m} = 0$ може означати, що m -та схема базування не рекомендована для N -ї деталі. У цьому

випадку $\Psi_{N,m} = 1$ означає, що m -та схема базування рекомендована лише для N -ї деталі. Крім того, обов'язковим є дотримання правила нормалізації:

$$\sum \Psi_{N,m} = 1 \quad (2.3)$$

Однак використання цієї формули для матриці $[\Xi]$ не є обов'язковим через наявність кількох ознак в одній частині. Проте рекомендується використовувати кожен елемент $\Xi_{N,n}$ в діапазоні від 0 до 1. Якщо N -та деталь має $k \geq 2$ різних ознак, значення $\Xi_{N,n}$ змінюються в межах наступного різновиду $\left\{0, \frac{1}{k-1}, \frac{2}{k-1}, \dots, 1\right\}$ з k раціональних чисел.

Після оцінки матриці $[W]$ нормалізований фактор прийняття рішення m -ї схеми базування для кожної N -ї деталі базується на векторі-стовпці $\{Y\}$ вагових коефіцієнтів, визначених за рівнянням:

$$Y_m^{(N)} = \frac{| \{W^{(m)}\}^T \cdot (\{\Xi\}^T)_N |}{\sum_m | \{W^{(m)}\}^T \cdot (\{\Xi\}^T)_N |} \quad (2.4)$$

Під час прийняття рішення для N -ї частини рекомендується вибрати j -ту схему базування з максимальним значенням $Y_{N,j}$ серед усіх значень $Y_{N,m}$.

У формулі (2.4), прийняття рішення для деталі з n конструкторсько-технологічними ознаками, відмінними від будь-якого рядка матриці $[\Xi]$, визначається наступним чином:

$$\{Y\} = \frac{[W]^T \{X\}}{\sum_m ([W]^T \{X\})_m} \quad (2.5)$$

де $\{X\}$ – вектор-стовпець $n \times 1$ конструкторсько-технологічних особливостей деталі; $\{Y\}$ – вектор-стовпець $m \times 1$ схеми базування.

2.2 Розширення класифікації деталей типу кронштейни за конструкторсько-технологічними ознаками

На основі проблемно-орієнтованого аналізу деталей типу кронштейни, запропоновано конструкторсько-технологічну класифікацію, яка враховує всі можливі конфігурації деталей, що можуть зустрічатися в машинобудуванні (рис. 2.2).

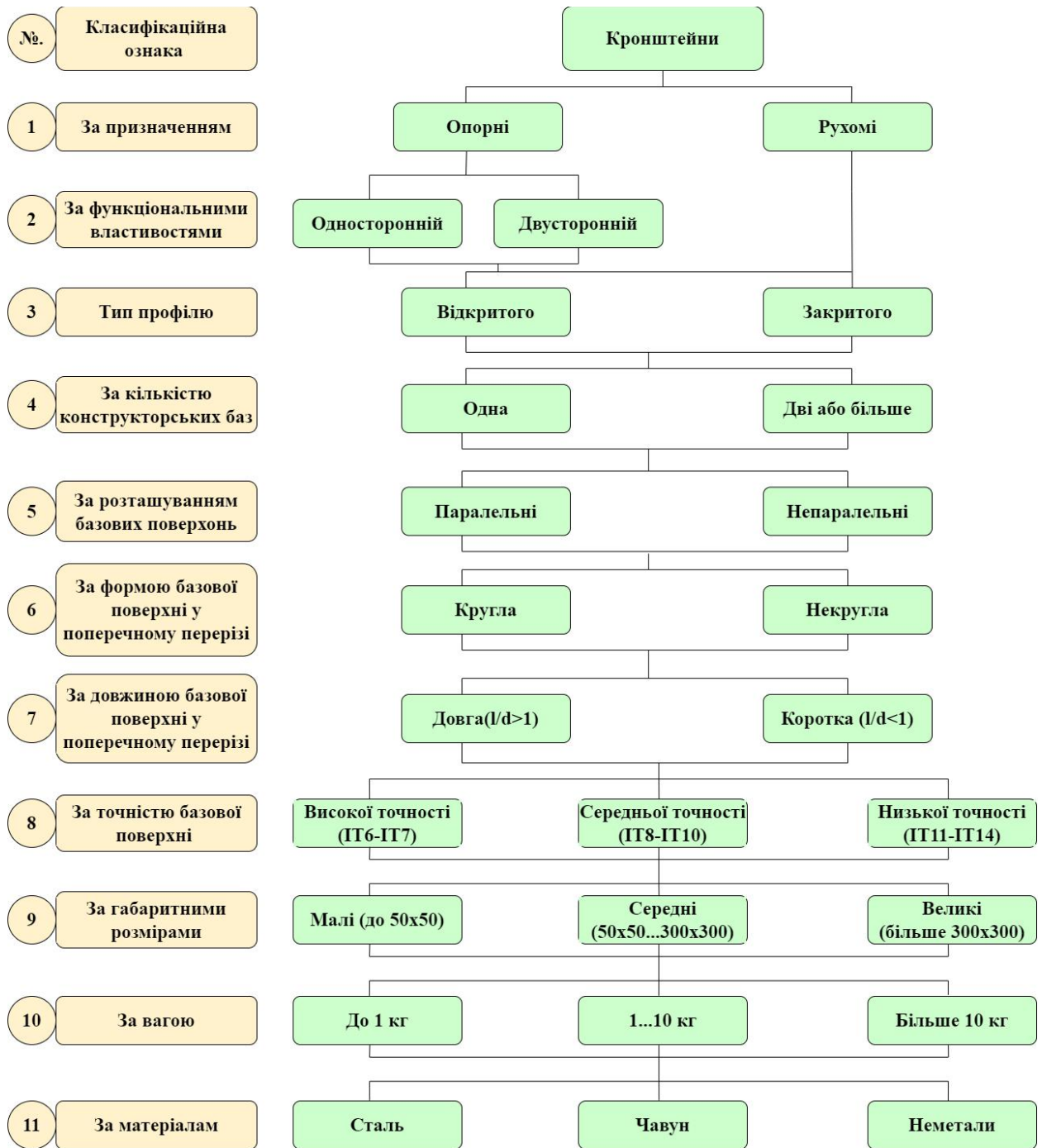


Рисунок 2.2 – Конструкторсько-технологічна класифікація деталей типу кронштейни

За довжиною базових поверхонь деталі класифікують на кронштейни з довгими ($l/d > 1$) та короткими ($l/d < 1$) базовими поверхнями, що принципово визначає спосіб їх базування при механічному обробленні та відповідно конструкцію ВП.

Деталі типу кронштейни зазвичай мають одну або кілька конструктивних поверхонь, які є паралельними або непаралельними одна одній. Базові поверхні в поперечному перерізі можуть бути круглими і некруглими, що визначає форму установлювальних і затискних елементів ВП.

За вагою кронштейни зі сталі (наприклад, AISI 1A, 1010, 1045 і 3135, DIN GS-60) і чавуну (наприклад, DIN 1691 і 1693-506-50) можна класифікувати на легкі (менше 1 кг), середні (1–10 кг), важкі (більше 10 кг), а також для неметалевих матеріалів, що впливає на вибір верстата, різального інструмента і призначення режимів різання при механічному обробленні.

Відповідно до призначення деталі типу кронштейни поділяють на кронштейни з високою (IT6–IT7), середньою (IT8–IT10) та низькою (IT11–IT14) точністю базових поверхонь. Виготовлення базових поверхонь із високою точністю при інших рівних умовах гарантує більш надійну та довговічну експлуатацію кронштейна та виробу в цілому. За габаритними розмірами кронштейни поділяють на малі (менше 50x50 мм), середні (50x50...300x300 мм) та великі (більше 300x300 мм), що визначає габаритні розміри ВП та необхідний робочий простір верстата при виготовленні.

Шорсткість поверхонь кронштейнів знаходиться у діапазоні значень $Ra = 0,8\text{--}6,3$ мкм і значно залежить від геометрії та матеріалу різальної частини інструмента, а також призначених режимів механічного оброблення, призначення яких здійснюється на основі стандартів, практичних рекомендацій або експериментальних досліджень [20].

На основі розроблених класифікацій складнопрофільних деталей запропоновано структурні коди, що характеризують будь-яку з вищевказаних деталей за конструкторсько-технологічними ознаками, що містять буквено-цифрові позначення. Дані коди можуть бути використані у САПР та інформаційно-пошукових системах із метою вибору компонувань ВП для вищезазначених деталей (рис. 2.3).

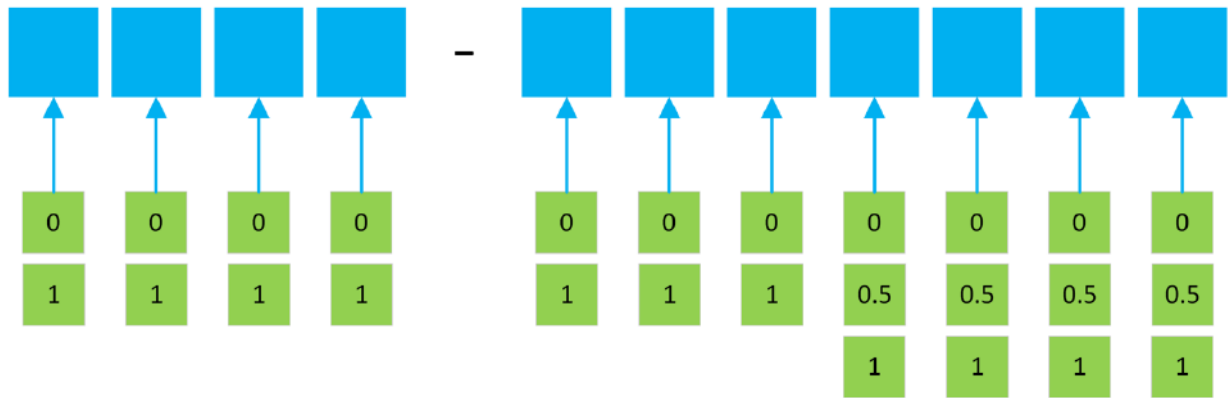


Рисунок 2.3 – Система кодування деталей типу кронштейни за конструкторсько-технологічними ознаками

2.3 Формалізація проектних процедур із застосуванням теорії множин та штучних нейронних мереж

Враховуючи інформацію, отриману з конструкторсько-технологічної документації, структурний код у формалізованому вигляді можна представити сукупністю, що містить множину конструкторських ($d_features$) та технологічних ($t_features$) ознак:

$$CODE = \langle d_features; t_features \rangle. \quad (2.6)$$

Множину конструкторських ознак, що є підмножиною класифікацій за призначенням ($purpose$), функціональними властивостями ($functional$), типом профілю ($profile$), наявністю конструкторських баз ($bases$), записують у вигляді:

$$d_features = \langle purpose, functional, profile, bases \rangle. \quad (2.7)$$

Множину технологічних ознак, до якої відносять розташування базових поверхонь ($locsurf$), форму базових поверхонь у поперечному перерізі ($formsurf$), тип базової поверхні ($typesurf$), точність базової поверхні ($accuracy$), габаритні розміри деталі ($sizes$), масу ($mass$), матеріал ($material$), записують у вигляді сукупності:

$$t_features = \langle locsurf, formsurf, typesurf, accuracy, sizes, mass, material \rangle. \quad (2.8)$$

Аналіз виявив конструкцію типових представників деталей типу кронштейни (рис. 2.4). Визначені деталі відрізняються за матеріалами, геометричною формою, кількістю поверхонь, схемами базування та технологією виготовлення.

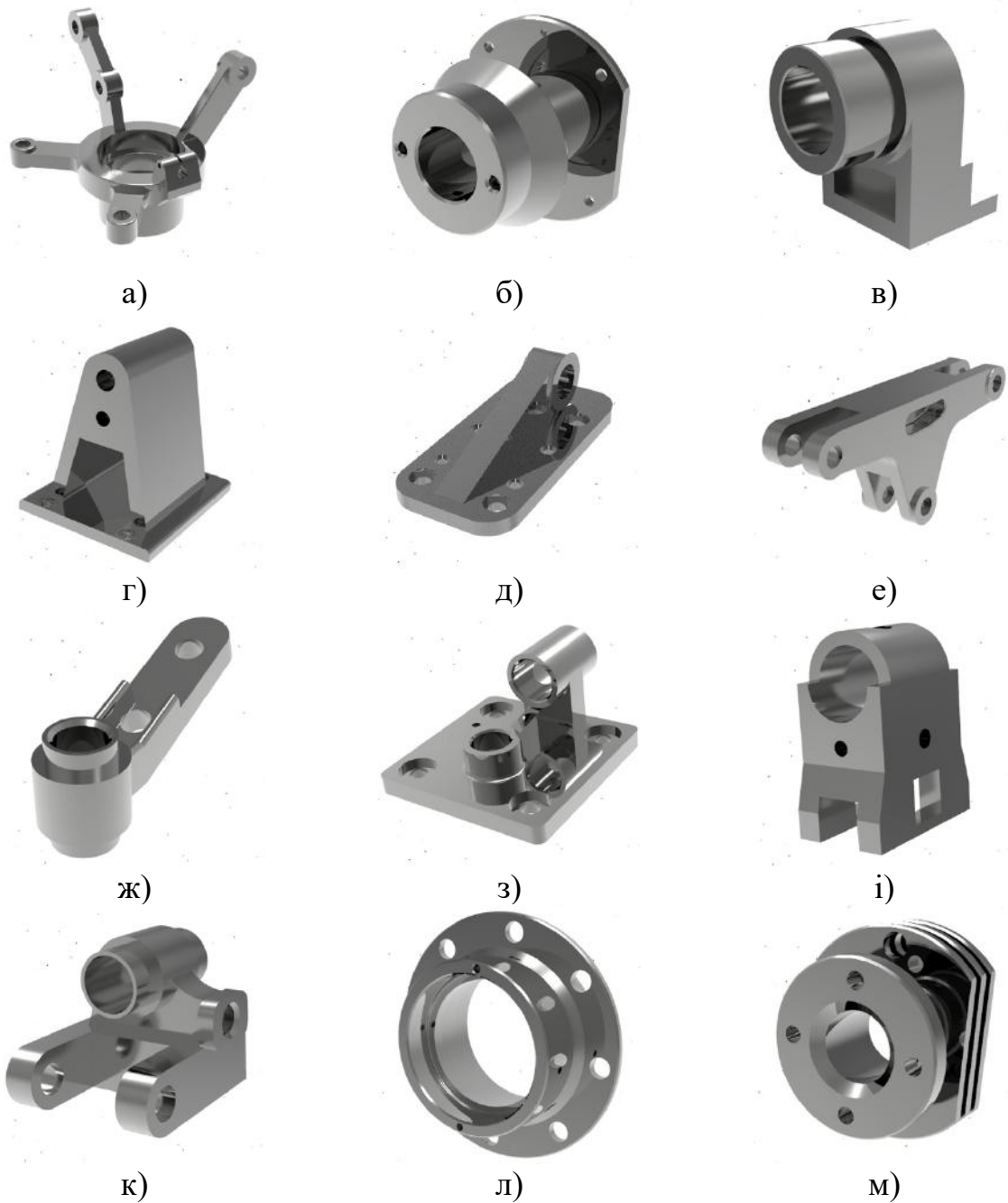


Рисунок 2.4 – Типові конфігурації деталей типу кронштейни

Для оцінювання матриці $[W]$ було враховано загальну кількість деталей $N=12$. Загальна кількість конструкторсько-технологічних ознак: $n=11$. Для перших 7 з них кількість ознак $k=2$; для останніх – $k=3$.

Усім вибраним деталям типу кронштейни присвоєно структурний код із урахуванням конструкторсько-технологічної класифікації. Схема базування визначена для всіх вибраних деталей на основі поверхонь, які підлягають обробленню. Розроблена модель враховує різні типи матеріалів – параметр 11 на рисунках 2.1 і 2.3 («S» – сталь AISI 3135 і «C» – чавун DIN 1691).

Вищезазначена інформація узагальнена в таблиці 2.2. Під час моделювання були розглянуті різні конфігурації деталей типу кронштейни, що виготовлені з різних матеріалів (табл. 2.2, колонка 2).

Таблиця 2.2 – Вхідні дані для розрахунків

Конфігурація деталей типу кронштейни (рис. 2.4)	Структурний код (рис. 2.1 і 2.3)	Схема базування (табл. 2.1)
а	SGO2–NCDHMMS *	5
б	MAC1–PCSMMS	2
в	SAC2–PCDHMLS	4
г	SAC2–NCSHMHC *	6
д	SAC1–NCDHLMS	5
е	SGC2–PNDHMMS	4
ж	MAO1–NCDMLLS	2
з	SGC2–NCSHLHS	4
і	SAC1–PCDMMLS	4
к	SGO2–NCDHMMS	3
л	SGO2–PCSHMMS	1
м	SAO2–PCSHMMS	2
* «S» – сталь AISI 3135; «C» – чавун DIN 1691.		

Отже, прямокутна матриця $\{\Psi\}$ конструкторсько-технологічних ознак має розмірність 12×11 :

$$[\Psi]=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0.5 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Загальна кількість схем базування $m=6$. Тому прямокутна матриця $[\Xi]$ має розмір 12×6 :

$$[\Xi]=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Слід зазначити, що всі стовпці мають принаймні одне ненульове значення для загального розгляду всіх типів схем базування.

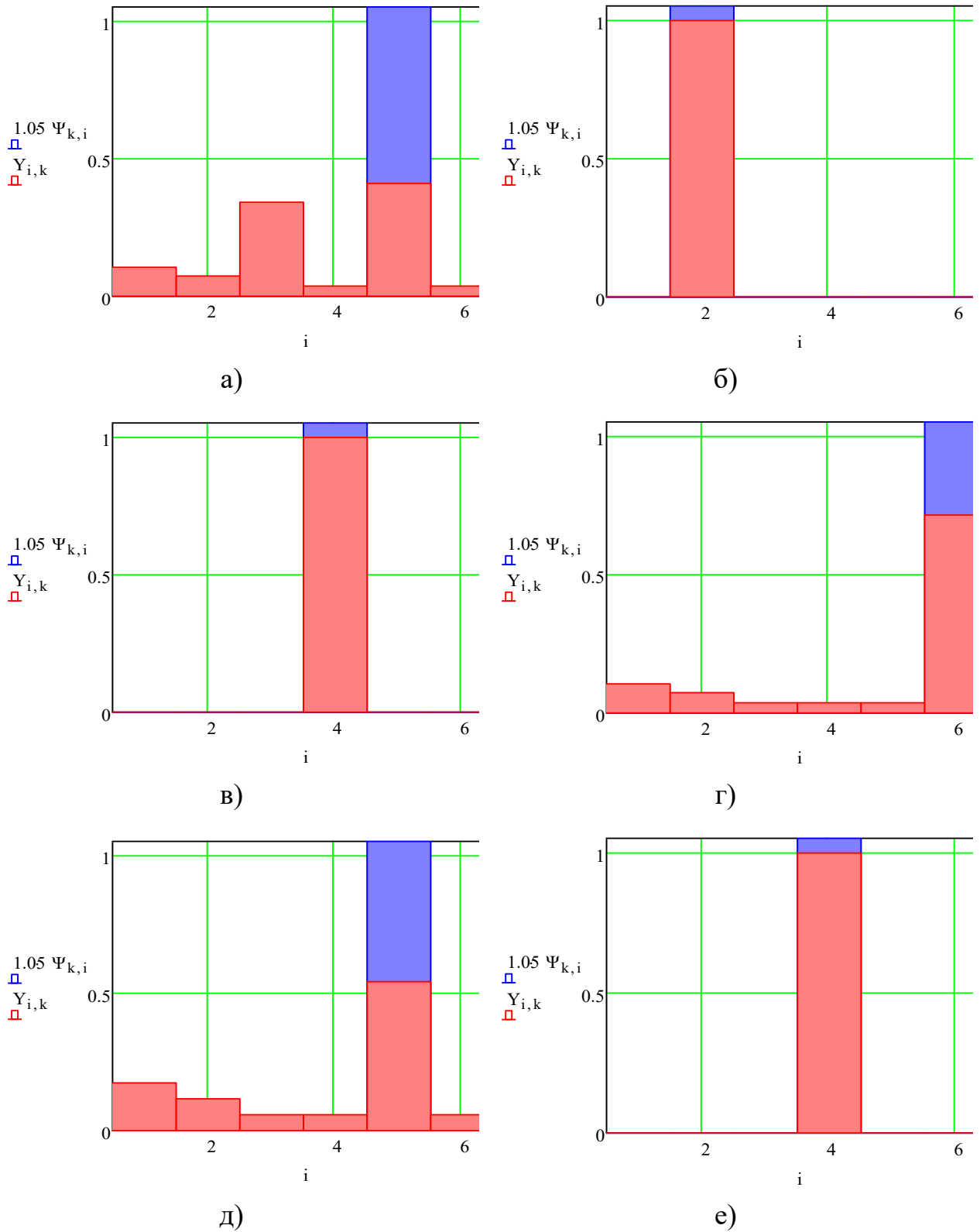
Для кожного типового представника деталей типу кронштейни автоматично виконано вибір раціональної схеми базування відповідно до запропонованого підходу на основі рівнянь (2.2) і (2.4). Зокрема, матриця перетворення визначається відповідно до рівняння (2.2):

$$[W]= \begin{bmatrix} 0.571 & 1.452 & 0.351 & -1.774 & 0.399 & -0.476 \\ 0.571 & -0.714 & 0.143 & 0.143 & -0.143 & -0.143 \\ 0.000 & -0.500 & -0.125 & 0.75 & -0.125 & 0.000 \\ -0.143 & -0.071 & -0.161 & 0.964 & -0.589 & 0.286 \\ -0.571 & -0.952 & -0.226 & 1.024 & -0.274 & 0.476 \\ 0.714 & 0.357 & -0.554 & 1.321 & -0.696 & 0.429 \\ 0.143 & 0.571 & 0.536 & 1.214 & 0.964 & -0.286 \\ -0.286 & -0.143 & -0.321 & 1.929 & -1.179 & 0.571 \\ 0.000 & 0.000 & -0.500 & 1.000 & -0.500 & 0.00 \\ 0.286 & 2.143 & 0.821 & -2.929 & 1679 & -0.571 \\ 0.286 & 0.473 & 0.238 & -0.762 & -0.238 & 0.762 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Коефіцієнти прийняття рішень 6×1 схем базування для кожної деталі з масиву $N=12$ були визначені за рівнянням (2.4). Їх значення підсумовано в таблиці 2.3 і графічно представлено на рисунку 2.5.

Таблиця 2.3 – Нормовані фактори прийняття рішень

Конфігурація деталей типу кронштейни (рис. 2.4)	Фактор прийняття рішення					
	1	2	3	4	5	6
а	0.107	0.071	0.339	0.036	0.411	0.036
б	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
в	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
г	0.107	0.071	0.036	0.036	0.036	0.714
д	0.171	0.114	0.057	0.057	0.544	0.057
е	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
ж	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
з	0.107	0.071	0.036	0.714	0.036	0.036
і	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
к	0.107	0.071	0.339	0.036	0.411	0.036
л	0.400	0.200	0.100	0.100	0.100	0.100
м	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000

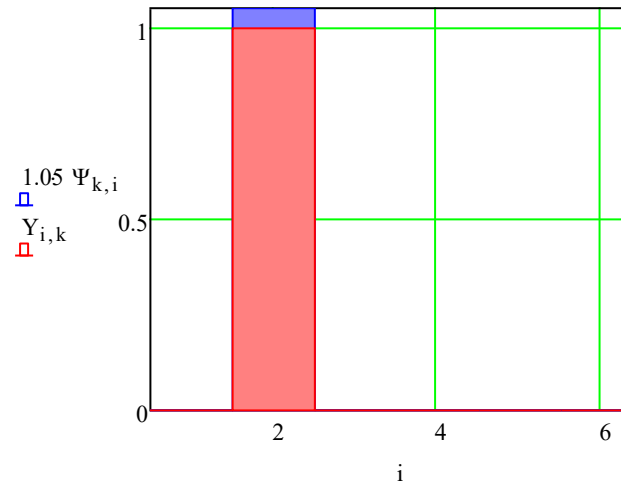


i – схема базування ($i = 1, 2, \dots, m$);

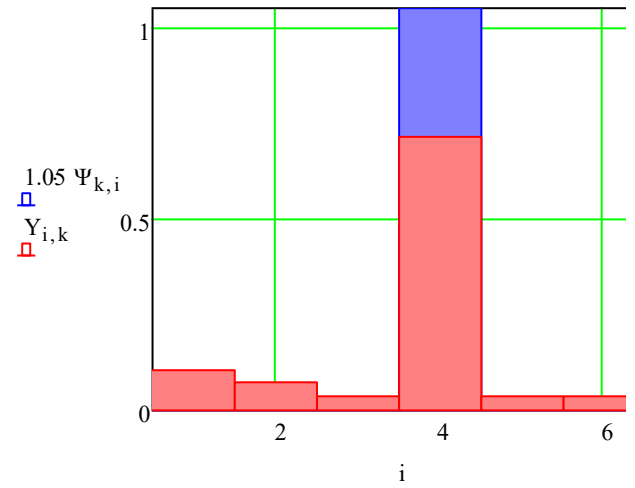
$\Psi_{k,i}$ – рекомендована схема базування для k -ої деталі ($k = 1, 2, \dots, N$);

$Y_{i,k}$ – розрахунковий ваговий коефіцієнт i -ої схеми базування для k -ї деталі

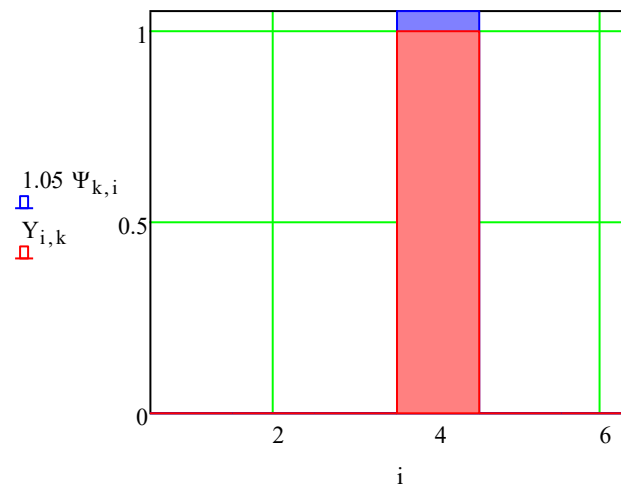
Рисунок 2.5 – Розрахунки вибору схеми базування, аркуш 1



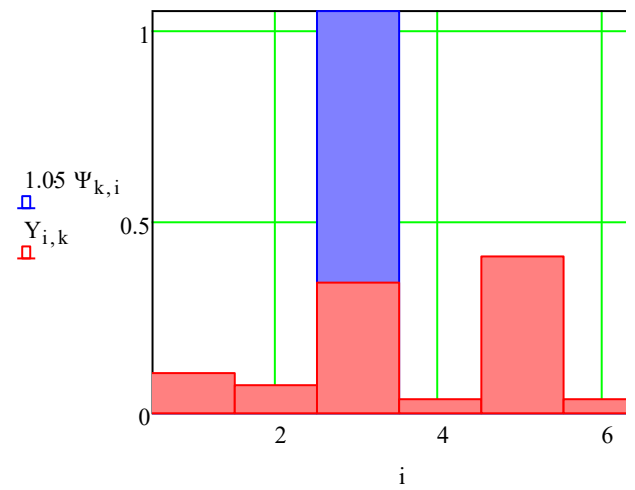
ж)



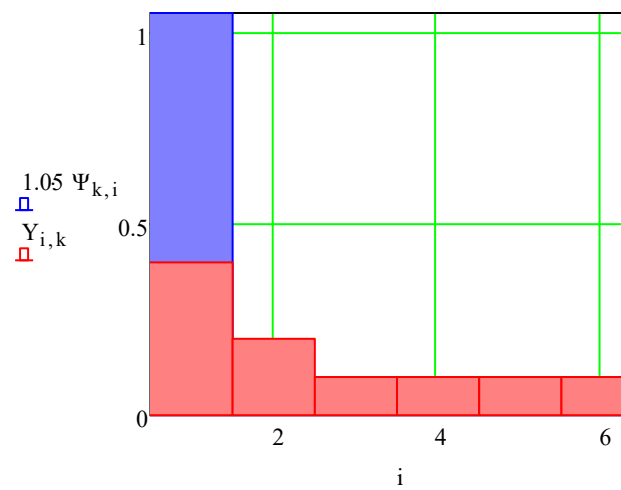
з)



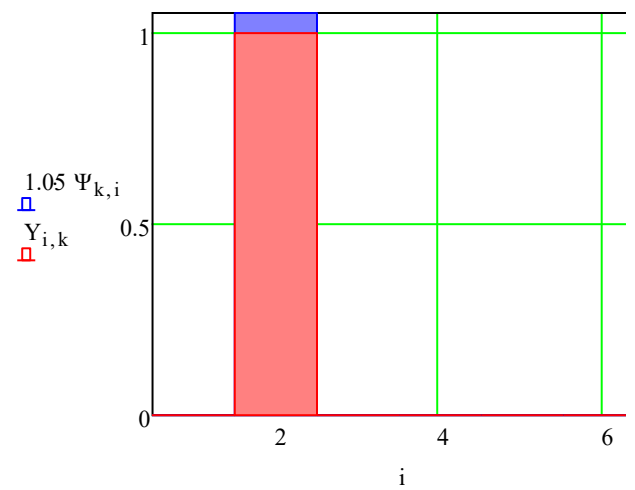
и)



к)



л)



м)

Рисунок 2.5, аркуш 2

Аналіз результатів прийняття рішення полягає в наступному. По-перше, результати числового розрахунку відповідають передбачуваній схемі базування для всіх деталей типу кронштейни. Цей факт обґрунтовує розроблену регресійну модель (2.1)–(2.4) для прийняття рішень щодо раціонального вибору схеми базування.

По-друге, для 10-ї деталі типу кронштейни метод прийняття рішень пропонує вибрати п'яту схему базування, незважаючи на розглянуту третю. Схема базування з використанням двох площин і отвору більше підходить для деталі, представленої на рисунку 2.5 к. Однак остаточний вибір схеми базування для деталі залежить від поверхні, що оброблюється.

Після оцінювання трансформаційної матриці $[W]$ застосування підходу прийняття рішення необхідно перевірити для довільної деталі. Конструкторсько-технологічні ознаки даної деталі відрізняються від раніше розглянутих даних. Деталь типу кронштейни, що обрана для перевірконого розрахунку, наведена на рис. 2.6 а.

На рисунку 2.6 б наведені функціональні поверхні. Оброблювані поверхні являють собою комбінацію чотирьох різних конструкторсько-технологічних елементів – трьох циліндричних отворів, циліндричного масиву з шести отворів, розташованих на торці, канавки та чотирьох ступінчастих отворів на нижній частині деталі. Необхідно виконати чотири різні технологічні переходи в одній технологічній операції. Таким чином, під час базування три поверхні будуть використовуватися як базові поверхні, а одна поверхня буде використовуватися як поверхня під притискач. З практичної точки зору заготовка повинна бути позбавлена 6 ступенів свободи – 2 перпендикулярних площин і зовнішньої циліндричної поверхні. Для забезпечити якісного закріплення деталі під час оброблення, зусилля повинно бути прикладене до площини, паралельної базовій точці (рис. 2.6 в).

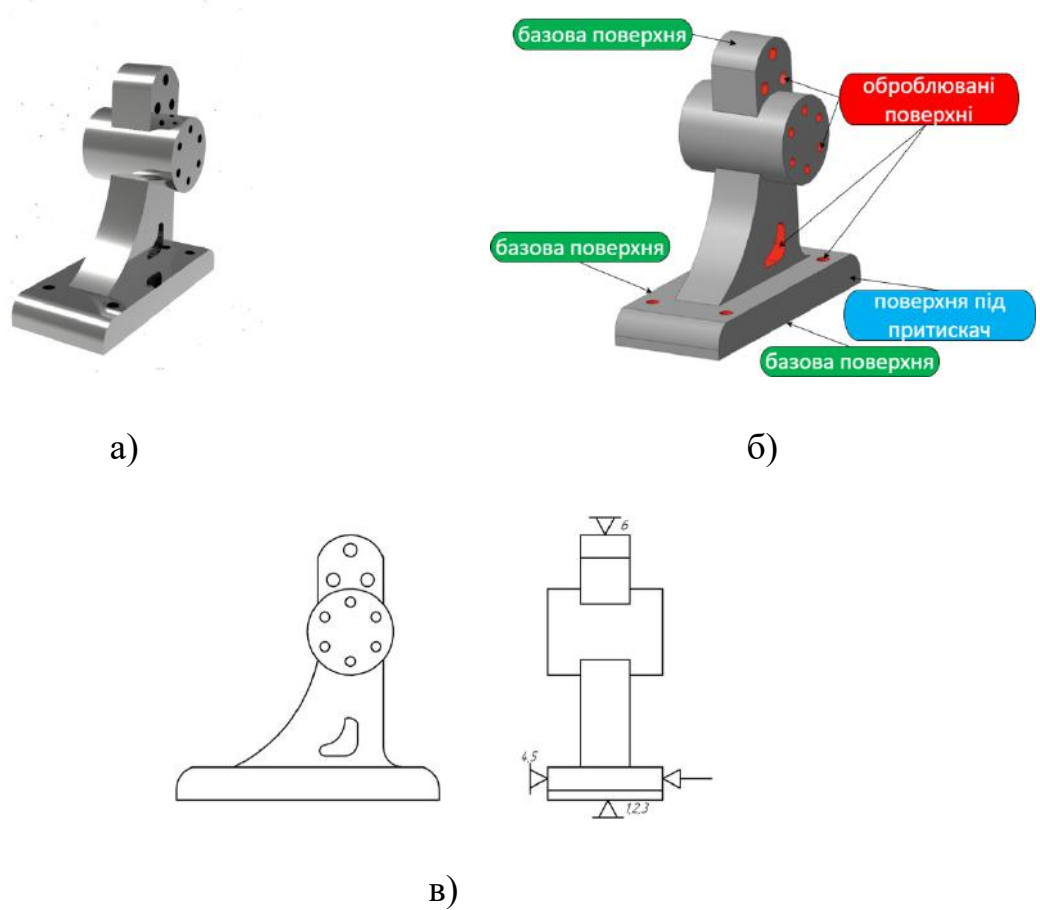


Рисунок 2.6 – Деталь типу кронштейни: а – загальний вигляд;
б – функціональні поверхні; в – схема базування та закріплення деталі

Структурний код деталі (рис. 2.6) – «SAC1–NCSHLMA» (рис. 2.1 і 2.3), а стовпець-вектор конструкторсько-технологічних ознак:

$$\{X\} = \{0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0.5\ 0.5\}^T \quad (2.12)$$

Отже, згідно з формулою (2.5), обчислений вектор-стовпець $\{Y\}$ схем базування виглядає наступним чином:

$$\{Y\} = \{0.194\ 0.546\ 0.065\ 0.065\ 0.065\ 0.065\}^T \quad (2.13)$$

Результат також представлено графічно на рисунку 2.7. Оскільки в результаті розрахунку другий коефіцієнт $Y_2 = 0,46$ є найбільшим, то кращою схемою базування є схема 2 – за зовнішньою циліндричною поверхнею та двома площинами. Результати розрахунків підтвердили, що на практиці при обробленні кронштейнів з подібними виробничими умовами слід вибирати схему за зовнішньою циліндричною поверхнею та площиною.

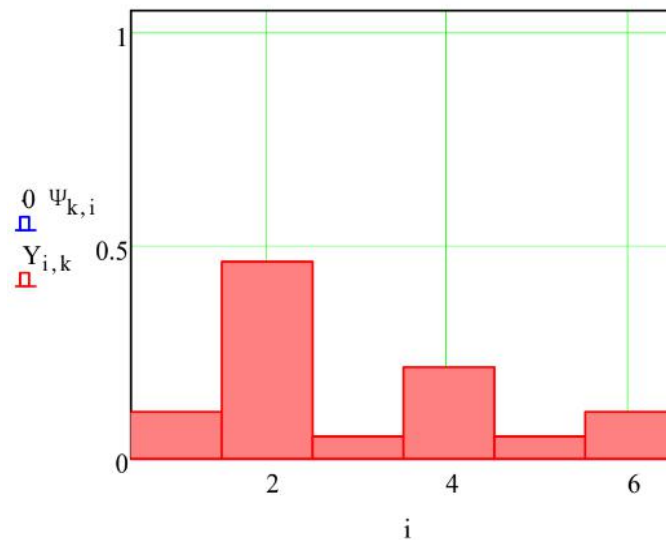


Рисунок 2.7 – Нормалізовані фактори прийняття рішень для довільної деталі

Для уточнення процедури вибору схем базування за конструкторсько-технологічними ознаками використовується не лише теорія множин з відповідною процедурою псевдооберненої матриці Пенроуза–Мура, але й нелінійні методи оцінювання, засновані на застосуванні штучної нейронної мережі (ШНМ), архітектура якої наведена на рисунку 2.8.

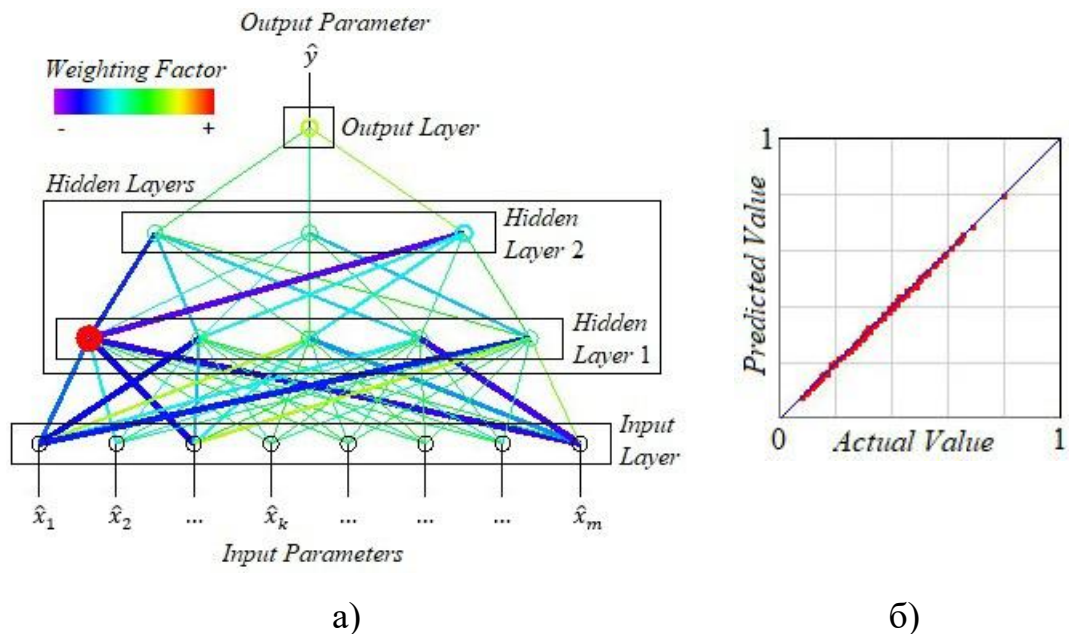


Рисунок 2.8 – Архітектура ШНМ (а) та збіжність процесу машинного навчання (б) при аналізі схем базування деталей типу кронштейни за конструкторсько-технологічними ознаками

ШНН містить конструкторсько-технологічні ознаки як вхідні параметри (“Input Parameters”), об’єднані в один початковий шар (“Input Layer”). Також встановлено, що для оцінювання схеми базування достатньо застосувати два прихованих шари (“Hidden Layer 1” та “Hidden Layer 2”) з п’ятьма та трьома нейронами відповідно.

Процедура застосування ШНН заснована на наступній залежності:

$$\{y\} = \sigma\langle [W]\{x\} + \{a\}\rangle, \quad (2.14)$$

де $\{x\}$ – множина конструкторсько-технологічних ознак;

$[W]$ – матриця коефіцієнтів впливу;

$\{a\}$ – масив елементів коригування;

$\{y\}$ – множина вихідних параметрів;

σ – функція нормування (гіперболічний тангенс), що переводить множину аргументів (довільних скалярних значень) у множину нормованих результатів у діапазоні від -1 до 1 .

Навчання ШНН здійснюється з допомогою процедури Backpropagation, яка широко застосовується у машинному навчанні і є дієвим алгоритмом навчання ШНН прямого зв’язку.

Використання ШНН здійснювалось із використанням відкритого програмного продукту “Visual Gene Developer”. Для навчання штучної нейронної мережі з масивом нормалізованих експериментальних даних були обрані такі параметри: швидкість навчання – $0,01$; коефіцієнт імпульсу – $0,1$; передаточна функція – гіперболічний тангенс; максимальна кількість циклів навчання – $1 \cdot 10^6$; похибка пошуку цільової функції – $1 \cdot 10^{-5}$; спосіб ініціалізації порогового значення та вагових коефіцієнтів – випадковий (з рівномірним законом розподілу); інтервал оновлення даних – 500 циклів.

У результаті навчання одержано такі параметри збіжності: сумарна відносна похибка – $1,6 \cdot 10^{-3}$; середня питома похибка – $1,6 \cdot 10^{-5}$. Таким чином, точність навчання штучної нейронної мережі є відносно високою.

У результаті застосування, ШНН видає один вихідний елемент (“Output Parameter”), який відповідає номеру раціональної схеми базування. Цей елемент належить до одиничного вихідного шару (“Output Layer”).

Під час оцінювання, ШНН застосовує ітераційну процедуру визначення коефіцієнтів впливу (“Weighting Factor”) між елементами вхідного шару, прихованих шарів та вихідного параметра. Значення цих факторів зазначені на рисунку 2.8 за допомогою кольору.

Візуалізація процесу збіжності регресійної процедури із застосуванням ШНН для дійсних параметрів (“Actual Value”) та оцінюваних параметрів (“Predicted Value”) показана на рисунку 2.8 б.

Високу точність раціонального вибору схеми базування для заданого набору вхідних параметрів за допомогою системи штучного інтелекту підтверджують наступні характеристики застосування ШНМ: регресійний коефіцієнт (момент) Пірсона – 0,9994; тангенс кривої збіжності – 0,9993; питома середньоквадратичне відхилення – 0,0007. Це підтверджує достовірність створеної регресійної моделі.

Таким чином, наукова новизна даного дослідження полягає в розробленні математичної моделі раціонального вибору схеми базування за конструкторсько-технологічними ознаками оброблюваної деталі на основі підходу прийняття рішень [21]. Перевірку розробленої моделі проведено на 12 практичних прикладах, а також для довільної деталі типу кронштейни.

Аналізуючи результати розрахунків (рис. 2.5), виділено три категорії. Перша категорія застосовується, коли розрахована схема розташування є єдиною можливою і збігається зі схемою базування, призначеною експертом (рис. 2.5 б, в, е, ж, і, м). Друга категорія застосовується, коли розрахована схема базування є однією з кількох можливих, але призначена експертна оцінка не відрізняється від результатів розрахунку (рис. 2.5 а, г, д, з, л). Третя категорія результатів відповідає прикладу з практики, коли серед кількох конкурентоспроможних схем базування призначена відрізняється від виконаних розрахунків (рис. 2.5 к). У цьому випадку остаточний вибір схеми

базування здійснює інженер-технолог з урахуванням геометричних і позиційних параметрів оброблюваних поверхонь, параметрів оброблення і заданих показників точності.

Значущість отриманих результатів та їх достовірність доведена їх порівнянням з нещодавніми результатами, отриманими у світі. Зокрема, у дослідженні [22] для автоматизованого проектування ВП було розроблено модуль проектування деталей вільної форми для системи автоматизованого проектування ВП. Автори дослідження [23] розробили математичну модель оптимального базування тонкостінних деталей у гнучких ВП. Комплексне математичне обґрунтування процесу базування деталей наведено в дослідженні [24].

У результаті досліджень розроблено науковий підхід до раціонального вибору схеми базування деталей складної форми базується на комплексному поєднанні 11 конструкторсько-технологічних ознак і підході прийняття рішень. Виконане дослідження деталей типу кронштейни доводить надійність запропонованого підходу. У роботі прийняті такі обмеження: мінімальна вага деталі – 1,2 кг, максимальна вага – 2,9 кг; матеріали – сталь (AISI 3135) і чавун (DIN 1691); діапазон точності базових поверхонь від Н6–Н11; діапазон габаритних розмірів варіювався від 48×44×40 мм до 187×189×149 мм; шорсткість поверхонь – Ra = 1,25–3,2. Кількість чисельних моделювань не менше загальної кількості конструкторсько-технологічних ознак при моделюванні.

Отримала подальший розвиток систематизація схем базування заготовок у ВП. Зокрема, визначено 6 схем базування та 23 способи реалізації при виготовленні деталей типу кронштейни на обробних центрах із ЧПК.

Практичне значення отриманих результатів підкреслюється необхідністю автоматизації процесу проектування ВП з метою скорочення витрат часу на етапі технологічної підготовки виробництва, що є важливим завданням в реалізації стратегії Industry 4.0.

2.4 Розроблення алгоритму програми автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей

Алгоритм автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками реалізовано у програмному середовищі системи комп'ютерної алгебри MathCAD у такий спосіб.

Спочатку обирається початковий індекс масиву за допомогою командного рядка:

“ ORIGIN := 1”

Після цього формується масив конструкторсько-технологічних ознак (рисунок 2.9).

D :=

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	1	0	1	1	0	1	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	1	0
2	1	0	1	0	1	0	0	0.5	0.5	0.5	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	1	0	0.5	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	0	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	1
5	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0.5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	1	1	1	0	1	1	0	0.5	0.5	0	0	0	0	1	0	0
7	1	0	0	0	1	0	1	0.5	1	0	0	0	1	0	0	0	0
8	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
9	0	0	1	0	0	0	1	0.5	0.5	0	0	0	0	0	1	0	0
10	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0.5	0.5	0	1	0	0	0	0
11	0	1	0	1	1	0	1	0	0.5	0.5	0	0	0	1	0	0	0
12	0	1	0	1	0	0	0	0	0.5	0.5	0	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0	1	0	0	0	0

Рисунок 2.9 – Масив конструкторсько-технологічних ознак

Після цього здійснюється оброблення множини даних за допомогою наступного програмного коду:

“ n := 1

m := cols(D) – n

N := rows(D)

$$\Xi := \text{submatrix}(D, 1, N, 1, n)$$

$$\Psi := \text{submatrix}(D, 1, N, n + 1, n + m) "$$

Сформовані матриці Ξ та Ψ дозволяють застосувати псевдообернений підхід Пенроуза–Мура для перевизначених множин. Цей підхід реалізується за допомогою наступних командних рядків:

$$" i := 1..n$$

$$W_i := (\Xi^T \cdot \Xi)^{-1} \cdot \Xi^T \cdot \Psi^{<i>}"$$

Подальша процедура нормування одержаних даних і виводу остаточних результатів раціонального вибору верстатного пристрою здійснюється із застосуванням програмного коду:

$$" j := 1..N$$

$$x_j := (\Xi^T)^{<j>}$$

$$y_{i,j} := W_i \cdot x_j$$

$$S_j := 0$$

$$S_j := S_j + |y_{i,j}|$$

$$Y_{i,j} := |y_{i,j}| / S_j "$$

Вивід результатів на екран здійснюється за допомогою вбудованих засобів системи комп'ютерної алгебри (рисунок 2.10).

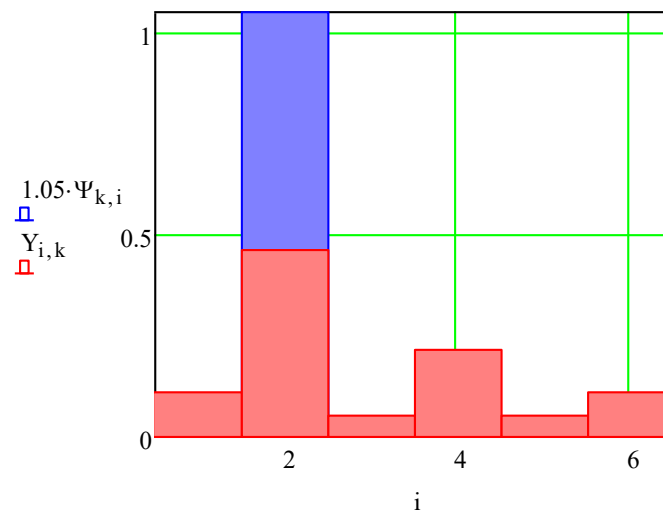


Рисунок 2.10 – Графічні результати застосування алгоритму програми автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв

Формування матриці коефіцієнтів впливу при реалізації процедури раціонального вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей здійснюється шляхом об'єднання масивів одержаних даних (рисунок 2.11):

“ $W := \text{augment}(W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6)$ ”.

$W =$

	1	2	3	4	5	6
1	1.45	-0.6	-0.4	-1.15	0.6	0.55
2	0.92	-1.16	-0.04	0.16	-0.04	0.08
3	0.01	-0.48	-0.12	0.73	-0.12	$-10 \cdot 10^{-3}$
4	-0.77	0.96	0.24	0.79	-0.76	-0.23
5	-1.54	0.92	0.48	0.58	-0.52	-0.46
6	-1.51	1.48	0.12	0.77	-0.88	-0.49
7	0.58	-0.84	0.04	-0.66	1.04	0.42
8	-1.54	1.92	0.48	1.58	-1.52	-0.46
9	0.36	0.72	-0.32	0.28	-0.32	-0.36
10	1.18	-0.64	-0.16	-1.86	1.84	0.82
11	0.84	-0.32	-0.08	-0.68	-0.08	1.16

Рисунок 2.11 – Узагальнена матриця коефіцієнтів впливу при реалізації процедури раціонального вибору компоновань верстатних пристроїв

Остаточне рішення щодо раціонального вибору верстатного пристрою для закріплення деталей типу кронштейни реалізується за таким програмним кодом:

“ $X := (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0.5 \ 0.5)^T$

$yy := W^T \cdot X$

$pp := 1..rows(yy)$

$SS := 0$

$SS := SS + |yy_{pp}|$

$YY_{pp} := |yy_{pp}| / SS$ ”

У результаті реалізації вищезазначеного алгоритму, програма повертає множину значення нормованих вагових коефіцієнтів матриці прийняття рішень:

$$“ Y = (0.108 \quad \mathbf{0.459} \quad 0.054 \quad 0.216 \quad 0.054 \quad 0.108) ”$$

Максимальне значення цього вектору обумовлює раціональний вибір компонування верстатного пристрою за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільної деталі.

2.5 Висновки до розділу 2

Таким чином, під час проведення дослідження розроблено метод розрахунку та прогнозування показників, що впливають на раціональний вибір компонування верстатного пристрою за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільної деталі. Це дозволяє точно і швидко здійснювати контроль основних параметрів для забезпечення інтенсифікації процесу оброблення. Запропонований підхід ґрунтується на комплексному науково-методологічному підході оцінювання кількісних значень формалізованих показників, що визначають вищезазначені конструкторсько-технологічні ознаки.

У результаті, розроблено методику моделювання процесу вибору верстатного пристрою для деталей типу кронштейни в залежності від масиву визначальних параметрів. Також застосовано методи теорії множин, засоби багатопараметричного квазілінійного регресійного моделювання для оцінювання цих параметрів, а також штучні нейронні мережі.

Особливу увагу приділено врахуванню точності визначення невідомих коефіцієнтів регресійної моделі і контролю над дотриманням заданої точності оцінювання параметрів, а достовірність запропонованого підходу щодо застосування регресійного аналізу та штучних нейронних мереж підтверджується високим значенням кореляційного моменту Пірсона.

У цілому, достовірність запропонованої математичної моделі підтверджується тим, що відносна похибка оцінювання параметрів нелінійної моделі із застосуванням штучних нейронних мереж не перевищує 5%.

ВИСНОВКИ

Таким чином, перший етап науково-дослідної роботи спрямований на розроблення структурно-функціональної моделі процесу проектування верстатних пристроїв для багатокординатного оброблення деталей типу кронштейни та створення математичної моделі автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей.

Для досягнення цієї мети, розроблено контекстну діаграму структурно-функціональної моделі процесу проектування верстатних пристроїв для закріплення деталей типу кронштейни за міжнародним стандартом IDEF0, а також створено математичну модель автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей із застосуванням системи комп'ютерно алгебри для аналізу перевизначених множин, а також засобів машинного навчання, зокрема псевдоінверсійного підходу Пенроуза–Мура та штучних нейронних мереж прямого зв'язку.

У результаті застосування комплексного підходу щодо визначення наборів вхідних і вихідних даних, масиву довідкової та керівної інформації, визначення структурних етапів та виявлення функціональних й інформаційних зв'язків між ними, розроблено алгоритм автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей.

У результаті розроблено алгоритм програми автоматизованого вибору компоновань верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками складнопрофільних деталей.

У цілому, запропоновані підходи дозволили розширити класифікацію деталей типу кронштейни та формалізувати проєктні процедури раціонального вибору верстатних пристроїв за конструкторсько-технологічними ознаками.

ПЕРЕЛК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Карпусь, В. Є. Інтенсифікація процесів механічної обробки / В. Є. Карпусь, В. О. Іванов, та О. В. Котляр. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 436 с.
2. Bi, Z. M. Flexible fixture design and automation / Z. M. Bi, W. J. Zhang // *International Journal of Production Research* – 2001. – №39. – pp. 2867–2894.
3. Nixon, F. *Managing to Achieve Quality and Reliability* / F. Nixon. Maidenhead, McGraw Hill, 1971.
4. Rong, Y. *Computer-Aided Fixture Design* / Y. Rong, Y. Zhu. – New York : Marcel Dekker, 1999. – 496 p.
5. Ivanov, V. *Process-Oriented Approach to Fixture Design* / V. Ivanov // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Cham: Springer, 2019. – pp. 42–50. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_5.
6. Botezatu, C. Use of the Ishikawa Diagram in the Investigation of Some Industrial Processes / C. Botezatu, I. Condrea, B. Oroian, A. Hrițuc, M. Ețcu, L. Slătineanu // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – 682. – 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/682/1/012012>.
7. Boyle, I. M. CAFixD: A Case-Based Reasoning Fixture Design Method. Framework and Indexing Mechanisms / I. M. Boyle, K. Rong, D. C. Brown // *The ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2006. – №6(1). – pp. 40–48. <https://doi.org/10.1115/1.2161229>.
8. Ivanov, V. Fundamental Approach for Analysis of Dynamic Characteristics of Fixtures / V. Ivanov, I. Pavlenko // *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*. – 2017. – №4(13). – pp. 1–10. <https://doi.org/10.4108/eai.20-3-2018.154366>.
9. Singal, R. K. *Fundamental of Machining and Machine Tools. Cutting Tool Materials and Cutting Fluids* / R. K. Singal, M. Singal, R. Singal. – 2010. – Chapter 22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17816.83200>.

10. Orgiyan, A. The Efficiency of Dynamic Vibration Dampers for Fine Finishing Boring / A. Orgiyan, V. Ivanov, V. Tonkonogyi, A. Balaniuk, V. Kolesnik // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Cham : Springer, 2023. pp. 140–149. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_14.

11. Orgiyan, A. Improvement of the Efficiency of Fine Boring for Stepped Holes with a Large Diameter Range / A. Orgiyan, G. Oborskyi, V. Ivanov, A. Balaniuk, V. Kolesnik // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Cham : Springer, 2022. – pp. 322–331. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_32.

12. Іванов Віталій Олександрович. Науково-прикладні основи підвищення ефективності обробки складнопрофільних деталей на свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатах: дис... докт. техн. наук : 05.02.08 / Іванов Віталій Олександрович. – Одеса, 2019. – 478 с.

13. Ivanov, V. Development of Flexible Fixtures with Incomplete Locating: Connecting Rods Machining Case Study / V. Ivanov, F. Botko, I. Dehtiarov, M. Kočiško, A. Evtuhov, I. Pavlenko, J. Trojanowska // *Machines*. – 2022. – №10(7). – 493. <https://doi.org/10.3390/machines10070493>.

14. Kushnirov, P. Improvement of the Milling Effectiveness by Application of Composite Milling Heads / P. Kushnirov, Y. Denysenko, B. Ostapenko, D. Zhyhylii, B. Stupin // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – Cham : Springer, 2022. – pp. 293–301. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_29.

15. Wan, N. An Intelligent Fixture Design Method Based on Smart Modular Fixture Unit / N. Wan, Z. Wang, R. Mo // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – №69(9-12). – pp. 2629–2649. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5134-3>.

16. Selvakumar, S. Design and Optimization of Machining Fixture Layout Using ANN and DOE / S. Selvakumar, K. P. Arulshri, K. P. Padmanaban, K. S. K. Sasikumar // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – №65(9). – pp. 1573–1586. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4281-2>.

17. Pavlenko, I. Using Regression Analysis for Automated Material Selection in Smart Manufacturing / I. Pavlenko, J. Pitel', V. Ivanov, K. Berladir, J. Mižáková, V. Kolos, J. Trojanowska // *Mathematics*. – 2022. – №10(11). – 1888. <https://doi.org/10.3390/math10111888>.
18. Singh, D. K. *Fundamentals of Manufacturing Engineering* / D. K. Singh. – 3rd ed. – London : Routledge, 2018.
19. Ivanov, V. Technological Assurance of Bracket-Type Parts Manufacturing / V. Ivanov, V. Kolos, O. Liaposhchenko, I. Pavlenko // In *EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, Proceedings of the 5th EAI International Conference on Management of Manufacturing Systems, Virtual, 27–28 October 2020*. – Cham: Springer, 2022. – pp. 397–409. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67241-6_31.
20. Vukelic, D. Optimization of Surface Roughness Based on Turning Parameters and Insert Geometry / D. Vukelic, M. Prica, V. Ivanov, G. Jovicic, I. Budak, O. Luzanin // *International Journal of Simulation Modelling*. – 2022. – №21(3). – pp. 417–428. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM21-3-607>.
21. Ivanov, V. Locating Chart Choice Based on the Decision-Making Approach / V. Ivanov, F. Botko, V. Kolos, I. Pavlenko, M. Hatala, K. Antosz, J. Trojanowska // *Materials*. – 2022. – №15(10). – 3557. <https://doi.org/10.3390/ma15103557>.
22. Parvaz, H. Development of Locating System Design Module for Freeform Workpieces in Computer-Aided Fixture Design Platform / H. Parvaz, M. J. Nategh // *Computer-Aided Design*. – 2018. – №104. – pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.04.004>.
23. Do, M. D. Optimal workpiece positioning in flexible fixtures for thin-walled components / M. D. Do, Y. Son, H.-J. Choi // *Computer-Aided Design*. – 2018. – №95. – pp. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2017.09.002>.
24. Qin, G. *Advanced Fixture Design Method and Its Application* / G. Qin. – Singapore : Springer, 2021.