

УДК 621.9-114

**В. О. ІВАНОВ, В. Є. КАРПУСЬ, С. М. ВАЩЕНКО, Й. ЗАЯЦЬ, А. І. КАРМАЗА****СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ**

Забезпечення механічної обробки деталей на металорізальних верстатах неможливе без застосування верстатних пристроїв. Вони є невід'ємною частиною замкненої технологічної системи «верстат – верстатний пристрій – різальний інструмент – заготовка» та чинять значний вплив на точність та якість обробки поверхонь деталей машин. У роботі визначено структурні етапи процесу проектування верстатних пристроїв і виявлено інформаційні зв'язки між ними для забезпечення комплексного підходу. Розроблено структурно-функціональну модель процесу проектування верстатних пристроїв, яка передбачає технологічний аналіз об'єкту обробки, синтез та оптимізацію компонентів верстатних пристроїв, інженерно-виробничий аналіз системи «верстатний пристрій – заготовка» для заданих виробничих умов, а також виявлено функціональні та інформаційні зв'язки між етапами, що дозволяє реалізувати комплексний підхід до проектування верстатних пристроїв.

**Ключові слова:** верстат, верстатний пристрій, компонування, проектування, технологічний аналіз, багатокритеріальна оптимізація, інженерний аналіз, САПР ВП, CAFD-система.

Обеспечение механической обработки деталей на металлорежущих станках невозможно без применения станочных приспособлений. Они являются неотъемлемой частью замкнутой технологической системы «станок – приспособление – режущий инструмент – заготовка» и значительно влияют на точность и качество обработки поверхностей деталей машин. В работе определены структурные этапы процесса проектирования станочных приспособлений и выявлены информационные связи между ними для обеспечения комплексного подхода. Разработана структурно-функциональная модель процесса проектирования станочных приспособлений, которая предусматривает технологический анализ объекта обработки, синтез и оптимизацию компоновок станочных приспособлений, инженерно-производственный анализ системы «станочное приспособление – заготовка» для заданных производственных условий, а также выявлены функциональные и информационные связи между этапами, что позволяет реализовать комплексный подход к проектированию станочных приспособлений.

**Ключевые слова:** станок, станочное приспособление, компоновка, проектирование, технологический анализ, многокритериальная оптимизация, инженерный анализ, САПР СП, CAFD-система.

Machining of parts on the metal-cutting machine tools could not be ensured without use of fixtures. They are the integral part of the closed-loop technological system “machine tool – fixture – cutting tool – workpiece” and make the significant impact on the accuracy and quality of machining of machine parts surfaces. The work presents the structural steps of fixture design and determines the data flows between them to ensure the complex approach. The structural-functional model of the process of fixture design has been developed, which provides the manufacturing analysis of the workpiece, synthesis and optimization of fixture configurations, engineering and production analysis of the system “fixture – workpiece” for set production conditions, and also functional connections and data flows between steps have been determined. The above-mentioned allows realizing of the complex approach to the fixture design.

**Keywords:** machine tool, fixture, configuration, design, manufacturing analysis, multicriteria optimization, verification, computer-aided fixture design, CAFD system.

**Вступ**

У сучасному машинобудуванні основним викликом є протиріччя між необхідністю зменшення витрат часу на проектування та виготовлення виробів та ускладненням конструкції виробів. За останні 15 років номенклатура виробів збільшилася більше ніж у 2 рази, їх складність постійно підвищується, зростають вимоги до точності та якості виробів [1, 2]. Сьогодні ринок потребує більше різновидів продукції, а отже, обладнання та процеси повинні бути більш гнучкими, щоб забезпечити потреби ринку та скоротити витрати часу виходу продукції на ринок. Це обумовлює необхідність розроблення та впровадження принципово нових конструкторсько-технологічних рішень для реалізації процесів, які мають бути спрямовані на інтенсифікацію та автоматизацію виробництва [3].

Одним із перспективних напрямків інтенсифікації конструкторсько-технологічної підготовки виробництва є розроблення та впровадження систем автоматизованого проектування верстатних пристроїв (САПР ВП), які дозволяють у автоматизованому режимі проектувати верстатні пристрої (ВП), оцінювати їх ефективність та розробляти необхідну конструкторсько-технологічну документацію.

Існуючі на даний час САПР ВП обмежені в своїй функціональності, що обумовлює низьку якість проектування, збільшує обсяг конструкторських робіт,

що спричиняє зростання витрат часу на проектування ВП. Для уникнення цієї проблеми раціональним є створення принципово нової САПР ВП, що зробить проектування більш якісним, забезпечуючи аналіз, синтез, оптимізацію компонентів ВП.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

В умовах сучасного машинобудівного виробництва, що характеризується нестабільністю номенклатури та обсягів випуску продукції, актуальним є раціональний вибір ВП, до яких висувуються наступні вимоги [4–8]: забезпечення заданої точності обробки; гнучкість, достатня для обробки деталей у межах технічної характеристики верстата; механізоване або автоматизоване переналагодження при переході до обробки деталей іншого типорозміру; висока жорсткість деталей та складальних одиниць, здатних сприймати значні сили різання та забезпечувати максімальне використання потужності обладнання; інструментальна доступність для обробки максімальної кількості поверхонь за один установ; високий рівень уніфікації деталей та складальних одиниць, що забезпечує зниження вартості ВП; висока функціональна та технологічна надійність ВП і його елементів; економичність. Основні вимоги при створенні ВП зведено до шести груп, враховуючи фізичні та точнісні можливості, вимоги до рівноважного стану системи, ефективність, інструментальну доступність, ергономічність [9].

© В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, С. М. Ващенко, Й. Заяць, А. І. Кармаза, 2017

Процес проектування ВП слід розглядати з позиції, що в процесі експлуатації ВП контактує з зовнішнім середовищем, зокрема заготовкою, різальним інструментом, верстатом, верстатником. Зовнішнє середовище створює певні обмеження, що безпосередньо впливають на структуру ВП і процес проектування [10, 11].

На сьогодні накопичений багаторічний досвід розроблення та впровадження САПР ВП, які значно прискорили та вдосконалили процес проектування ВП, дозволяючи конструкторам на стадії проектування комплексно проаналізувати властивості майбутнього ВП до його виготовлення.

За призначенням САПР ВП, які у англійському середовищі називаються САФД-системи, поділяються на системи, призначені для проектування спеціальних [12], збірних [13–15] та переналагоджуваних ВП [12, 16]. Ґрунтовний огляд існуючих САПР оснастки та САПР ВП розглянуто у роботах [9, 12, 14, 17–23] та ін.

За ступенем автоматизації САПР ВП традиційно класифікують на інтерактивні (I-САФД), напівавтоматизовані (Semi-AFD) та автоматизовані (AFCD) [16].

Аналіз існуючих САПР ВП показав, що типова структура [21] складається з чотирьох модулів, які забезпечують поетапне вирішення задачі формування структури технологічної операції, визначення виробничих умов, синтез компонувань ВП та інженерний аналіз спроектованого ВП.

Основними завданнями САФД-систем, більшість яких призначена для операцій механічної обробки заготовок, є [24]:

- визначення функціональних поверхонь заготовки та вибір відповідних стандартизованих нерегульованих функціональних елементів із бази даних;
- компонування ВП із обраних елементів;
- аналіз компонувань ВП здебільшого за одним критерієм (наприклад, точність установа заготовки, жорсткість компонування, металомісткість, ергономічність тощо);
- розроблення конструкторської документації (складальне креслення, специфікація, схема складання та налагодження компонування ВП).

Подальший розвиток САФД-систем можливий, перш за все, за рахунок вдосконалення їх функціональності. Насамперед, це впровадження математичного апарату для багатокритеріального вибору найвигідніших компонувань ВП із числа конкуруючих варіантів, причому перелік та кількість критеріїв можуть змінюватися або доповнюватися відповідно до заданих умов виробництва. Доведено доцільність формування бібліотек функціональних елементів на основі системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв [6], яка є найефективнішою в умовах багатомономенклатурного виробництва. Для оцінки похибок, які виникають внаслідок пружних деформацій під дією сил різання необхідним є виконання скінченноелементного аналізу компонувань ВП із

урахуванням динамічних характеристик. Перспективним є оснащення САФД-систем інструментом для розмірного аналізу 3D моделей компонувань ВП із метою врахування похибки виготовлення функціональних елементів ВП при подальших розрахунках. Актуальним є розроблення 3D анімацій процесів складання та налагодження компонувань ВП, що дозволить скоротити витрати підготовчо-заключного часу, пов'язаного з налагодженням ВП до експлуатації.

**Метою дослідження** є визначення структурних етапів процесу проектування ВП і виявлення інформаційних зв'язків між ними для забезпечення повного циклу конструювання, оптимізації та інженерного аналізу ВП для заданих виробничих умов.

### Матеріал і результати дослідження.

#### 1 Автоматизоване проектування верстатних пристроїв у комп'ютерно-інтегрованій системі виробництва

Комп'ютерно-інтегрована система виробництва (СІМ) забезпечує вирішення задач проектування (САД), аналізу та оптимізації (САЕ), розроблення технології виготовлення виробів (САПР), автоматизацію процесу виробництва (САМ) та контролю (САК), автоматизоване проектування технологічної оснастки (САТ). У свою чергу САТ-технологія поділяється на системи автоматизованого проектування інструменту (САТД) та системи автоматизованого проектування ВП (САФД). На рис. 1 показано місце САПР ВП у структурі комп'ютерно-інтегрованої системи виробництва, налагоджені інформаційні зв'язки якої забезпечують скорочення витрат часу та вартості проектування, підвищення якості розроблених конструкторсько-технологічних рішень (рис. 2).

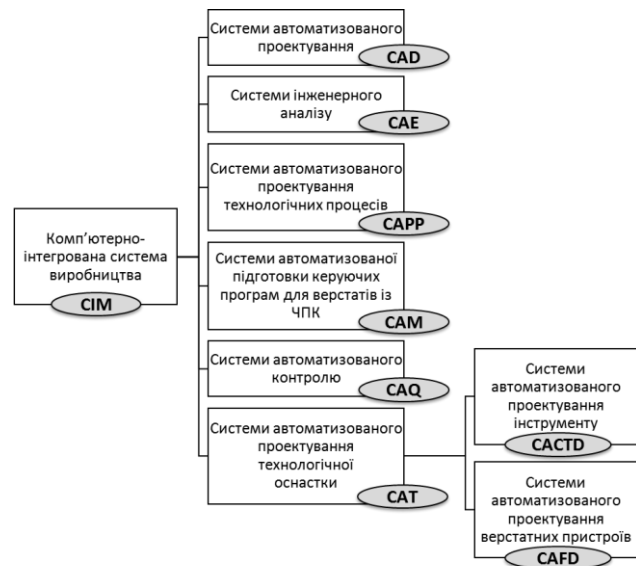


Рис. 1 – Загальна структура комп'ютерно-інтегрованої системи виробництва

САФД-системи можна інтегрувати з САД/САЕ/САПР/САМ системами, а отже, виконувати повний цикл проектування, аналізу, синтезу та виготовлення ВП. Отже, процес проектування ВП повинен

будуватися з урахуванням інтеграції з вище переліченими системами. На рис. 3 наведено місце САПР систем серед інших автоматизованих систем та їх інформаційні взаємозв'язки.

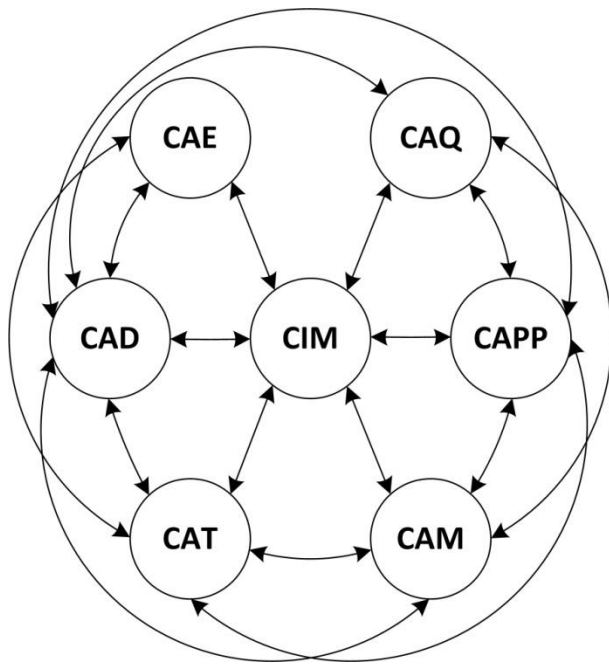


Рис. 2 – Інформаційні зв'язки у комп'ютерно-інтегрованій системі виробництва

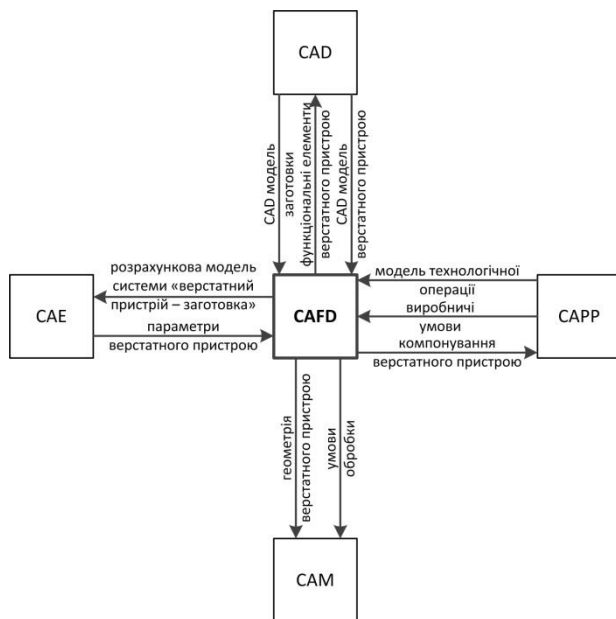


Рис. 3 – Місце САПР ВП серед інших систем та їх інформаційні взаємозв'язки

## 2 Контекстна діаграма структурно-функціональної моделі процесу проектування верстатних пристроїв

На початковому етапі створення САПР ВП важливо зрозуміти всі процеси, які необхідно автоматизувати. Процес проектування ВП процес розглядається з позиції інженера-конструктора. Найбільш зручним інструментом моделювання процесів є структур-

но-функціональне моделювання за стандартом IDEF0 [25].

У IDEF0 система розглядається як сукупність взаємодіючих етапів або функцій. Такий підхід є принциповим, оскільки функції системи аналізуються незалежно від об'єктів, якими вони оперують. Це дозволяє більш чітко змодельовати логіку та взаємодію процесів проектування.

Процес проектування ВП є трудомістким і потребує опрацювання великого обсягу інформації, яку прийнято класифікувати на постійну та змінну. Постійна інформація, яка може бути нормативна (державні стандарти, довідники, каталоги, рекомендації, вимоги, нормативні та керівні документи тощо) та експертна (накопичені знання інженера-конструктора), характеризує об'єкт, відомості про які відомі до початку процесу проектування ВП. Змінною є інформація, яка піддається змінам при кожній новій проектній задачі та класифікується на вхідну (завдання на проектування), проміжну (генерується у процесі роботи і використовується при взаємодії модулів системи) та вихідну (результати проектування).

Інформаційна підтримка процесу проектування ВП виконується за допомогою розробленої бази даних [26], яка складається з 15 прикладних бібліотек, та охоплює весь спектр необхідної інформації: конструкторсько-технологічного, нормативно-довідкового, загальноінженерного та оптимізаційно-розрахункового характеру [27].

Для створення діаграм процесу проектування за нотацією IDEF0 використано програму AllFusion Process Modeler 7 (BPwin). Першим етапом моделювання є створення контекстної діаграми структурно-функціональної моделі процесу проектування ВП (рис. 4), яка у найбільш узагальненому вигляді описує процес проектування ВП. Запропоновано комплексний підхід проектування ВП, який складається з трьох структурних етапів, кожний з яких є логічним продовженням попереднього (рис. 5). Так, на основі вхідних даних здійснюється технологічний аналіз заготовки, на основі якого відбувається синтез конкуруючих варіантів компоновки ВП і виконується багатокритеріальна оптимізація, результат якої є основою для інженерно-виробничого аналізу системи «верстатний пристрій – заготовка». Такий підхід є принципово новим для галузі проектування ВП, комплексно вирішуючи завдання конструювання, оптимізації та інженерного аналізу ВП для заданих виробничих умов, що вкрай важливо для сучасного машинобудівного виробництва.

## 3 Технологічний аналіз об'єкту обробки

Аналіз 3D моделі передбачає ідентифікацію функціональних поверхонь заготовки, які можуть бути: оброблені; базові; поверхні під притискачі. Це дозволяє отримати інформацію про: геометрію (форму) поверхонь; просторове розташування певних поверхонь відносно інших; розмірні характеристики поверхонь (довжина, ширина, висота, діаметр). Із креслення (або іншої супроводжувальної документації) необхідно отримати інформацію: поле допуску для кожної з поверхонь; шорсткість поверхонь; марку матеріалу; твердість матеріалу заготовки; вид термічної обробки; інші технічні вимоги.

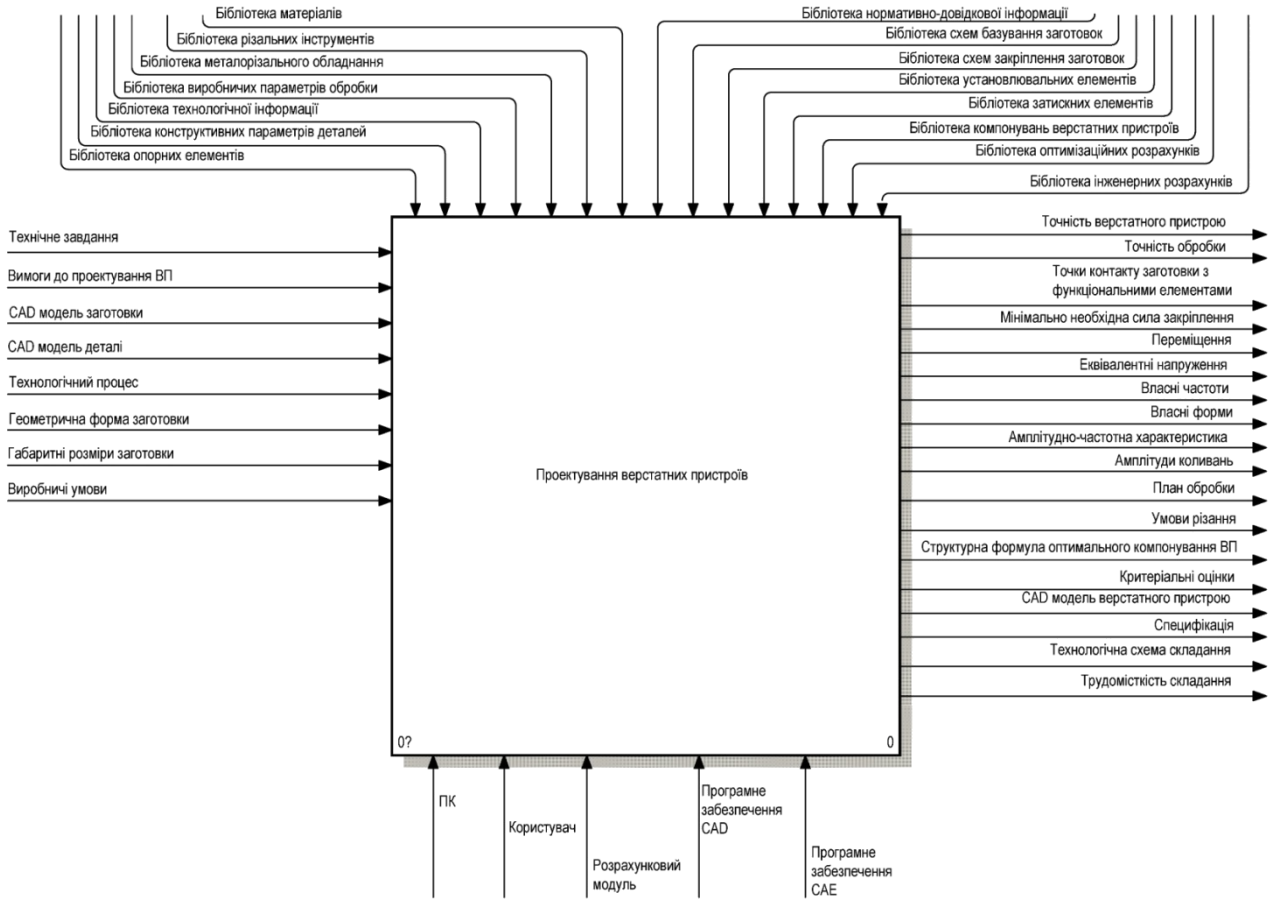


Рис. 4 – Контекстна діаграма процесу проектування верстатних пристроїв

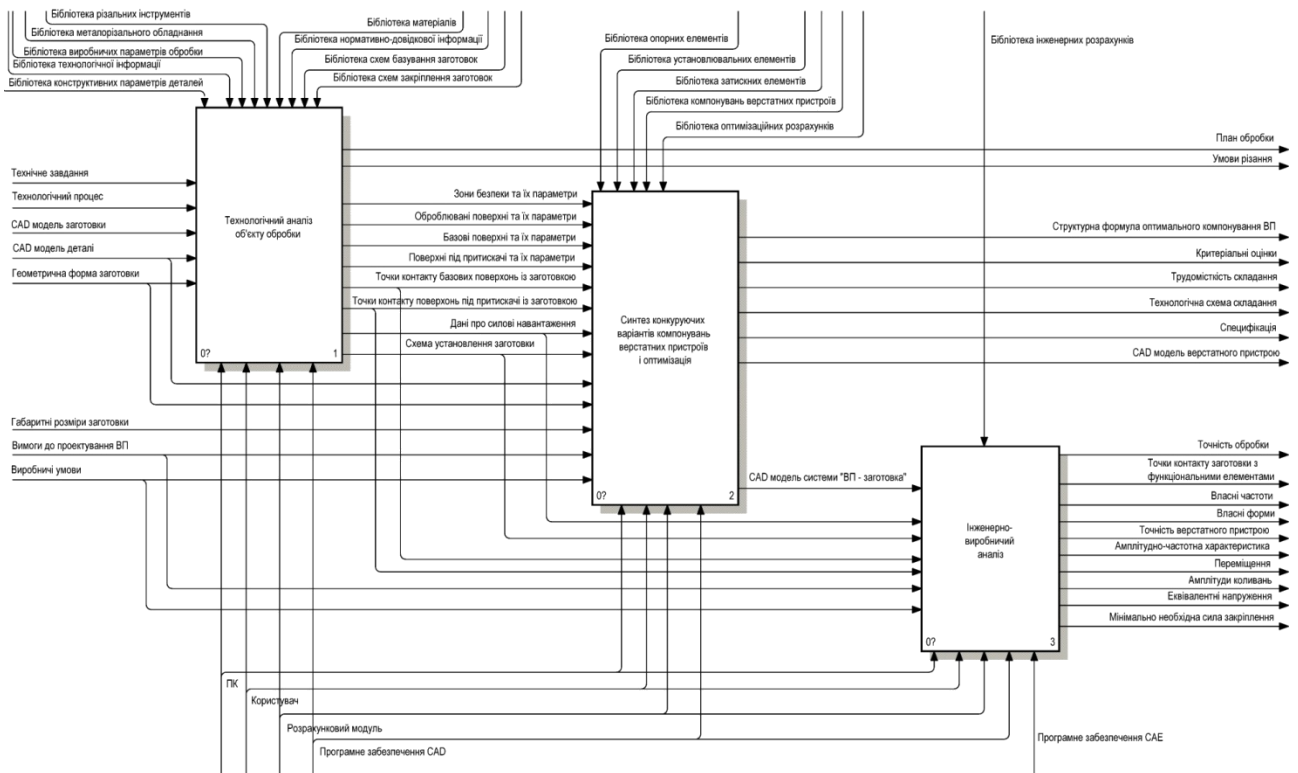


Рис. 5 – Декомпозиція процесу проектування верстатних пристроїв

На основі інформації про оброблювані поверхні, формується план обробки поверхонь. На даному етапі визначаються: принципова схема обробки поверхонь; режими різання (глибина різання, подача, швидкість різання); сила різання; необхідна потужність верстата.

Сукупність базових поверхонь реалізують теоретичну схему базування із визначенням точок контакту заготовки з установлювальними елементами ВП. Аналіз поверхонь під притискачі дозволяє вибрати одну з типових схем закріплення, а також точки контакту заготовки з затискними елементами.

Розроблена методика визначення точок контакту заготовки з функціональними елементами ВП дозволяє обґрунтовано обирати оптимальні рішення для кожної проектної ситуації.

На основі плану обробки, схем базування та закріплення заготовки формується схема установлення та обробки заготовки з вказівкою величин та напрямків дії сил різання та закріплення у визначеній системі координат.

#### 4 Синтез та оптимізація компоновань верстатних пристроїв

На даному етапі виконується два процеси – синтезу та оптимізації. На основі виявлених взаємозв'язків, інформаційних потоків, а також розроблених правил і методик, враховуючи конфігурацію заготовки, параметри функціональних поверхонь, обрані схему базування та схему закріплення заготовки, обираються установлювальні та затискні елементи, які відповідають заданим параметрам. Відповідно до габаритних розмірів і геометричної форми заготовки, а також заданим вимогам до проектування ВП здійснюється вибір опорних елементів. Це дозволяє сформувати сукупності конкуруючих варіантів опорних, установлювальних і затискних елементів. Далі на їх основі та з урахуванням раніше створених компоновань ВП, які містяться у базі даних, відбувається формування конкуруючих варіантів компоновань ВП за розробленим алгоритмом [28].

Впровадження оптимізаційних розрахунків дозволяє обирати оптимальне компонування ВП для конкретних виробничих умов на основі багатокритеріальної оптимізації. Першочергово вибираються критерії оптимальності, які відповідають проектній задачі, ранжуються за важливістю, формується система обмежень. Далі, використовуючи систему оптимізації [29] та нормативно-довідкову інформацію з бази даних, здійснюється вибір компоновань ВП, які задовольняють системі обмежень. Для компоновань ВП, які залишились внаслідок накладання технічних обмежень, виконується розрахунок чисельних параметрів за кожним критерієм оптимальності. Далі здійснюється багатокритеріальна оптимізація [30]. У результаті оптимізаційної задачі отримуємо структурну формулу оптимального компонування ВП та розраховані критеріальні оцінки. Знаючи коди функціональних елементів, що входять до структурної формули оптимального компонування ВП, та інформацію з бібліотек функціональних елементів, здійснюється складання ВП за розробленою методикою просторового позиціонування структурних елементів системи «ВП – заготовка».

#### 5 Інженерно-виробничий аналіз

Проведення інженерного аналізу є надзвичайно важливим етапом, оскільки це дозволяє прогнозувати параметри майбутнього ВП ще на етапі проектування. Для кожної проектної задачі існує можливість вибору задач та формування плану дослідження системи «ВП – заготовка» з урахуванням вимог до проектування ВП та виробничих умов. Структурно-функціональною моделлю передбачається можливість виконання розрахунків: на точність обробки деталей за методикою [31]; дослідження стійкості рівноважного стану системи «верстатний пристрій – заготовка» [32], дослідження напружено-деформованого стану [33], проведення модального аналізу [34] та гармонічного аналізу [35, 36].

На основі запропонованої структурно-функціональної моделі процесу проектування ВП обґрунтовано та розроблено структуру САПР ВП, яка складається з 5 модулів та підсистеми, яка забезпечує інформаційну підтримку процесу проектування, до складу якої входять 15 прикладних бібліотек [37].

#### Висновки

Розроблено структурно-функціональну модель процесу проектування ВП, яка передбачає технологічний аналіз об'єкту обробки, синтез та оптимізацію, інженерно-виробничий аналіз системи «ВП – заготовка», а також встановлено функціональні та інформаційні зв'язки між етапами, що реалізовує комплексний підхід до організації процесу проектування ВП.

Функціональні можливості розробленої САПР ВП у автоматизованому режимі забезпечують пошук оптимального компонування ВП для заданих виробничих умов, зменшують терміни виконання проектних процедур та підвищують ефективність проектування.

#### Список літератури

1. The Future of Manufacturing: Bringing the real and virtual world together [Електронний ресурс] // Siemens AG. – 2015. – Режим доступу: <http://w3.siemens.com/topics/global/en/industry/future-of-manufacturing/Documents/feature-infografik/all/en/index.html?stc=wwcg102138#/conclusions/469>.
2. Bi Z.M., Lang S.Y.T., Verner M., Orban P. Development of Reconfigurable Machines. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, Vol. 39, pp. 1227–1251, doi: 10.1007/s00170-007-1288-1.
3. Карпуть В. Є. Інтенсифікація процесів механічної обробки: монографія / В. Є. Карпуть, В. О. Іванов, О. В. Котляр та ін.; за ред. В. Є. Карпуся. – Суми : Сумський державний університет, 2012 – 436 с., doi: 10.13140/2.1.3953.7604.
4. Обратимая технологическая оснастка для ГПС / Н. Д. Жолткевич, И. Я. Мовшович, А. С. Кобзев и др. – К. : Техніка, 1992. – 216 с.
5. Карпуть В. Є. Современные требования к технологической оснастке станков с ЧПУ / В. Є. Карпуть, В. А. Іванов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2008. – № 22. – С. 23–35.
6. Карпуть В. Є. Универсально-сборные перенастраиваемые приспособления / В. Є. Карпуть, В. А. Іванов // Вестник машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 46–50.
7. Karpus V. E., Ivanov V. A. Universal-Composite Adjustable Machine-Tool Attachments. Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, Issue 11, pp. 1077–1083, doi: 10.3103/S1068798X08110105.
8. Пермяков А. А. К вопросу об унификации установочно-зажимных приспособлений агрегатированного оборудования / А. А. Пермяков, И. Я. Яковенко // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – 2016. – № 33 (1205). – С. 38–41.
9. Boyle I., Rong Y., Brown D. A Review and Analysis of Current Computer-Aided Fixture Design Approaches. International Journal

- of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, Vol. 27, pp. 1–12, doi: 10.1016/j.rcim.2010.05.008.
10. Ракович А. Г. Автоматизация проектирования приспособлений для металлорежущих станков. – М. Машиностроение, 1980. – 136 с.
  11. Pehlivan S., Summers J. A Review of Computer-aided Fixture Design with Respect to Information Support Requirements. International Journal of Production Research, 2008, Vol. 46, No. 4, pp. 929–947, doi: 10.1080/00207540600865386.
  12. Rong Y., Huang S.H., Hou Z. Advanced Computer-aided Fixture Design. Elsevier Academic Press, New York (2005).
  13. Rong Y., Zhu, Y. Computer-Aided Fixture Design. Marcel Dekker, New York (1999).
  14. Nee A.Y.C., Senthil Kumar A., Tao Z.J. An Advance Treatise on Fixture Design and Planning. World Scientific, Singapore (2004).
  15. Rong Y. Chapter 4. Computer-Aided Modular Fixture Design. In: Leondes C.T. (ed.) Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems. Vol. 4: Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM), pp. 103–170. World Scientific, Singapore (2003).
  16. Nee A.Y.C., Whybrew K., Senthil Kumar A. Advanced Fixture Design for FMS. Springer-Verlag, London (1995).
  17. Hargrove S.K., Kusiak A. Computer-aided Fixture Design: A Review. International Journal of Production Research, 1994, Vol. 32, pp. 733–753, doi: 10.1080/00207549408956967.
  18. Жолткевич Г. Н. Автоматизация проектирования технологической оснастки: теория и практика / Г. Н. Жолткевич. – К.: Техніка, 1998. – 263 с.
  19. Bi Z.M., Zhang W.J. Flexible Fixture Design and Automation: Review, Issues and Future Directions. International Journal of Production Research, 2001, Vol. 39, pp. 2867–2894, doi: 10.1080/00207540110054579.
  20. Kang X., Peng Q. Recent Research on Computer-Aided Fixture Planning. Journal of Recent Patents on Mechanical Engineering, 2009, Vol. 2, pp. 8–18, doi: 10.2174/2212797610902010008.
  21. Wang H., Rong Y., Li H., Price S. Computer-Aided Fixture Design: Recent Research and Trends. Journal of Computer-Aided Design, 2010, Vol. 42, pp. 1085–1094, doi: 10.1016/j.cad.2010.07.003.
  22. Vukelic D., Tadic B., Luzanin O. et al. A Rule-based System for Fixture Design. Scientific Research and Essays, 2011, Vol. 6 (27), pp. 5787–5802, doi: 10.5897/SRE11.1138.
  23. Parvaz H., Nategh M.J. A Pilot Framework Developed as a Common Platform Integrating Diverse Elements of Computer Aided Fixture Design. International Journal of Production Research, 2013, Vol. 51, No. 22, pp. 6720–6732, doi: 10.1080/00207543.2013.832000.
  24. Иванов В. О. Сучасні САФД-системи у машинобудуванні та перспективи розвитку / В. О. Иванов, В. Є. Карпусь // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : тези доповідей Десятої всеукр. молод. науково-техн. конф., 26–30 жовтня 2010 р., Суми. – Суми : СумДУ, 2010. – С. 62–64.
  25. Методология IDEF0 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://alice.pnzgu.ru/case/caseinfo/bpwin/part3.php>.
  26. Свідчення про рестрацію авторського права на твір № 70511, Україна, Комп'ютерна програма "Database for Fixture Design" / Иванов В. О., Ващенко С. М., Багрий Я. В.; авторські майнові права – Сумський державний університет; дата рестрації 17.02.2017.
  27. Иванов В. А. База данных – основа проектирования станочных приспособлений / В. А. Иванов, Я. В. Багрий // Прогрессивные технологии и процессы : сборник статей Междунар. молод. научно-техн. конф., 25–26 сентября 2014 г., Курск. – С. 243–247.
  28. Карпусь В. Е. Выбор оптимальной компоновки универсально-сборных переналаживаемых приспособлений / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2012. – № 3. – С. 3–9.
  29. Karpus V.E., Ivanov V.A. Choice of Optimal Construction of Modular Reusable Fixtures. Russian Engineering Research, 2012, Vol. 32, Issue 3, pp. 213–219, doi: 10.3103/S1068798X12030124.
  30. Карпусь В. Є. Оптимізація механічної обробки тіл обертання: монографія / В. Є. Карпусь, О. В. Котляр, В. О. Иванов; за ред. В. Є. Карпуся. – Харків : НТМТ, 2012. – 296 с., doi: 10.13140/RG.2.1.3518.8967.
  31. Ivanov V., Dehtiarov I., Pavlenko I. Mathematical Model of the Fixture Flexibility Impact on Machining Accuracy of Levers. Acta Mechanica Slovaca, 2016, Vol. 20, Issue 2, pp. 6–15.
  32. Павленко І. В. Забезпечення умов стійкості заготовки у верстатному пристрої зі схемою базування за трьома площинами / І. В. Павленко, В. О. Иванов // Вісник СНАУ : науковий журнал. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2015. – № 11 (27). – С. 23–26.
  33. Иванов В. О. Оцінювання нелінійної жорсткості функціональних елементів верстатних пристроїв / В. О. Иванов, І. В. Павленко // Машинобудування очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали Шістнадцятої міжнар. молод. науково-техн. конф., 26–29 жовтня 2016 р., Суми. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – С. 23–24.
  34. Курилов Б. М. Застосування комп'ютерних засобів для дослідження динаміки механічної системи «верстатний пристрій – заготовка» / Б. М. Курилов, І. В. Павленко, В. О. Иванов // Сучасні технології у промисловому виробництві: матер. наук.-техн. конф. викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій : у двох частинах, 18–21 квітня 2017 р., Суми. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – Ч. 1. – С. 149.
  35. Павленко И. В. Математическая модель динамики системы «станочное приспособление – заготовка» на примере схемы базирования по трём плоскостям / И. В. Павленко, В. А. Иванов, Б. Н. Курилов, С. О. Чигрин // Безопасность и проектирование конструкций в машиностроении : сборник научных трудов Междунар. научно-техн. конф., 25–26 октября 2015 г., Курск. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 119–122.
  36. Иванов В. А. Гармонический анализ системы «станочное приспособление – заготовка» на примере схемы базирования по трём плоскостям / В. А. Иванов, И. В. Павленко, Б. Н. Курилов и др. // Инновации в металлообработке: взгляд молодых специалистов : сборник научных трудов Междунар. научно-техн. конф., 2–3 октября 2015 г., Курск. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2015. – С. 158–161.
  37. Ivanov V., Vashchenko S., Rong Y. Information Support of the Computer-aided Fixture Design System. Proc. of 12th Int. Conf. ICTERI'2016, Kyiv, Ukraine, June 21–24, 2016, CEUR-WS.org, online CEUR-WS.org/Vol-1614/paper\_37.pdf.

## References (transliterated)

1. The Future of Manufacturing: Bringing the real and virtual world together. – Siemens AG. – 2015. – Available at: <http://w3.siemens.com/topics/global/en/industry/future-of-manufacturing/Documents/feature-infografik/all/en/index.html?stc=wwcg102138#/conclusions/469>.
2. Bi Z.M., Lang S.Y.T., Verner M., Orban P. Development of Reconfigurable Machines. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, Vol. 39, pp. 1227–1251, doi: 10.1007/s00170-007-1288-1.
3. Karpus V.E., Ivanov V.O., Kotliar O.V. et al. Intensyfikacija procesiv mehaničnoj obrobky [Intensification of Manufacturing Processes]; edited by V. E. Karpus. Sumy, Sumy State University, 2012, 436 p., doi: 10.13140/2.1.3953.7604.
4. Zholtkevich N.D., Movshovich I.Ja., Kobzev A.S. et al. Obratimaja tehnologicheskaja osnastka dlja GPS [Reusable Tooling for FMS]. Kyiv, Tehnika, 1992, 216 p.
5. Karpus V.E., Ivanov V.A. Sovremennyye trebovaniya k tehnologicheskoy osnastke stankov s ChPU [Modern Requirements to Tooling for CNC Machine Tools]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008, No. 22, pp. 23–35.
6. Karpus V.E., Ivanov V.A. Universal'no-sbornye perenalazhivaemye prispособlenija [Modular Readjusted Attachments]. Vestnik mashinostroeniya, 2008, no. 11, pp. 46–50.
7. Karpus V.E., Ivanov V.A. Universal-Composite Adjustable Machine-Tool Attachments. Russian Engineering Research, 2008, Vol. 28, Issue 11, pp. 1077–1083, doi: 10.3103/S1068798X08110105.
8. Permjakov A.A., Jakovenko I.Ja. K voprosu ob unifikacii ustanovочно-zazhimnyh prispособlenij agregatirovannogo oborudovaniya [Concerning Unification of Locating-and-Clamping Fixtures of Modular Equipment]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, No. 33 (1205), pp. 38–41.
9. Boyle I., Rong Y., Brown D. A Review and Analysis of Current Computer-Aided Fixture Design Approaches. International Journal of Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, Vol. 27, pp. 1–12, doi: 10.1016/j.rcim.2010.05.008.

10. Rakovich A.G. Avtomatizacija proektirovanija prisposoblenij dlja metallorzhushhiih stankov [Automation of Fixture Design for Metal-cutting Machine Tools]. Moscow, Mashinostroenie, 1980, 136 p.
11. Pehlivan S., Summers J. A Review of Computer-aided Fixture Design with Respect to Information Support Requirements. International Journal of Production Research, 2008, Vol. 46, No. 4, pp. 929–947, doi: 10.1080/00207540600865386.
12. Rong Y., Huang S.H., Hou Z. Advanced Computer-aided Fixture Design. Elsevier Academic Press, New York (2005).
13. Rong Y., Zhu, Y. Computer-Aided Fixture Design. Marcel Dekker, New York (1999).
14. Nee A.Y.C., Senthil Kumar A., Tao Z.J. An Advance Treatise on Fixture Design and Planning. World Scientific, Singapore (2004).
15. Rong Y. Chapter 4. Computer-Aided Modular Fixture Design. In: Leondes C.T. (ed.) Computer Aided and Integrated Manufacturing Systems. Vol. 4: Computer-Aided Design / Computer-Aided Manufacturing (CAD/CAM), pp. 103–170. World Scientific, Singapore (2003).
16. Nee A.Y.C., Whybrow K., Senthil Kumar A. Advanced Fixture Design for FMS. Springer-Verlag, London (1995).
17. Hargrove S.K., Kusiak A. Computer-aided Fixture Design: A Review. International Journal of Production Research, 1994, Vol. 32, pp. 733–753, doi: 10.1080/00207549408956967.
18. Zholtkevich G.N. Avtomatizacija proektirovanija tehnologicheskoi osnastki: teorija i praktika [Automation of Tooling Design: Theory and Practice]. Kyiv, Tehnika, 1998, 263 p.
19. Bi Z.M., Zhang W.J. Flexible Fixture Design and Automation: Review, Issues and Future Directions. International Journal of Production Research, 2001, Vol. 39, pp. 2867–2894, doi: 10.1080/00207540110054579.
20. Kang X., Peng Q. Recent Research on Computer-Aided Fixture Planning. Journal of Recent Patents on Mechanical Engineering, 2009, Vol. 2, pp. 8–18, doi: 10.2174/2212797610902010008.
21. Wang H., Rong Y., Li H., Price S. Computer-Aided Fixture Design: Recent Research and Trends. Journal of Computer-Aided Design, 2010, Vol. 42, pp. 1085–1094, doi: 10.1016/j.cad.2010.07.003.
22. Vukelic D., Tadic B., Luzanin O. et al. A Rule-based System for Fixture Design. Scientific Research and Essays, 2011, Vol. 6 (27), pp. 5787–5802, doi: 10.5897/SRE11.1138.
23. Parvaz H., Nategh M.J. A Pilot Framework Developed as a Common Platform Integrating Diverse Elements of Computer Aided Fixture Design. International Journal of Production Research, 2013, Vol. 51, No. 22, pp. 6720–6732, doi: 10.1080/00207543.2013.832000.
24. Ivanov V.O., Karpus V.E. Suchasni CAFD-sistemi u mashinobuduvanni ta perspektivi rozvitku [Modern CAFD Systems in Manufacturing Engineering and Future Trends]. Mashinobuduvannya Ukraïni ochima molodih: progresivni idei – nauka – virobnytvo : tezi dopovidej Desjatoj vseukr. molod. naukovo-tehn. konf., 26–30 zhovtnja 2010 r., Sumy [Proc. of 10th All-Ukrainian Scientific and Technical Conf.]. Sumy, Sumy State University, 2010, pp. 62–64.
25. Metodologija IDEF0 [Methodology of IDEF0]. – Available at: <http://alice.pnzgu.ru/case/caseinfo/bpwin/part3.php>.
26. Ivanov V.O., Vashchenko S.M., Bahrii Y.V. Computer Program “Database for Fixture Design”. Certificate for copyright № 70511, Ukraine, date of registration 17.02.2017.
27. Ivanov V.A., Bahrii Y.V. Baza dannyh – osnova proektirovanija stanochnyh prisposoblenij [Database – the Foundation of Fixture Design]. Progressivnye tehnologii i process [Progressive Technologies and Processes], Kursk, 2014, pp. 243–247.
28. Karpus V.E., Ivanov V.A. Vybór optimal'noj komponovki universal'no-sbornyh perenalazhivaemyh prisposoblenij [Selection of Optimal Assembling of Universal-Modular Re-adjustable Attachments]. Vestnik mashinostroeniya, 2012, No. 3, pp. 3–9.
29. Karpus V.E., Ivanov V.A. Choice of Optimal Construction of Modular Reusable Fixtures. Russian Engineering Research, 2012, Vol. 32, Issue 3, pp. 213–219, doi: 10.3103/S1068798X12030124.
30. Karpus V.E. Optimizacija mehanichnoi obrobki til obertannja [Optimization of Manufacturing Processes of Rotational Parts]; edited by V. E. Karpus. Kharkiv, NTMT, 2012, 296 p., doi: 10.13140/RG.2.1.3518.8967.
31. Ivanov V., Dehtiarov I., Pavlenko I. Mathematical Model of the Fixture Flexibility Impact on Machining Accuracy of Levers. Acta Mechanica Slovaca, 2016, Vol. 20, Issue 2, pp. 6–15.
32. Pavlenko I.V., Ivanov V.O. Zabezpechennja umov stijkosti zagotovki u verstatnomu pristroji zi shemoju bazuvannja za tr'oma ploshhinami [Ensuring of the Workpiece Stability Conditions in the Fixture with Locating Scheme on Three Planes]. Sumy, Visnik SNAU [Bulletin of Sumy National Agrarian University], 2015, No. 11 (27), pp. 23–26.
33. Ivanov V.O., Pavlenko I.V. Ocinjuvannja nelinejnoi zhorstkosti funkcional'nih elementiv verstatnih pristroiv [Estimation of Nonlinear Stiffness of Functional Elements of Fixtures]. Mashinobuduvannya ochima molodih: progresivni idei – nauka – virobnytvo : tezi dopovidej Desjatoj vseukr. molod. naukovo-tehn. konf., 26–29 zhovtnja 2016 r., Sumy [Proc. of 16th Int. Scientific and Technical Conf.]. Sumy, Sumy State University, 2010, pp. 23–24.
34. Kurilov B.M., Pavlenko I.V., Ivanov V.O. Zastosuvannja komp'juternih zasobiv dlja doslidzhennja dinamiki mehanichnoi sistemi «verstatnij pristirij – zagotovka» [Using Computer Applications for Investigation of the Dynamics of Mechanical System “Fixture – Workpiece”]. Suchasni tehnologii u promisl'ovomu virobnytvi: mater. nauk.-tehn. konf. vkladachiv, spivrobnytkiv, aspirantiv i studentiv fakul'tetu tehnicnih sistem ta energoefektivnih tehnologij : u dvoch chastinah, 18–21 kvitnja 2017 r., Sumy [Proc. of Scientific and Technical Conf.]. Sumy, Sumy State University, 2017, Vol. 1, p. 149.
35. Pavlenko I.V., Ivanov V.A., Kurilov B.N. et al. Matematicheskaja model' dinamiki sistemy «stanochnoe prisposoblenie – zagotovka» na primere shemy bazirovanija po trjom ploskostjam [Mathematical Model of the Dynamics of Mechanical System “Fixture – Workpiece” with Locating Scheme on Three Planes]. Bezopasnost' i proektirovanie konstrukcij v mashinostroenii [Safety and Construction Design in Manufacturing Engineering]. Kursk, South-West State University, 2015, pp. 119–122.
36. Ivanov V.A., Pavlenko I.V., Kurilov B.N. et al. Garmonicheskij analiz sistemy «stanochnoe prisposoblenie – zagotovka» na primere shemy bazirovanija po trjom ploskostjam [Harmonic Analysis of the system “Fixture – Workpiece” with Locating Scheme on Three Planes]. Innovacii v metalloobrabotke: vzgljad molodyh specialistov [Innovations in Machining: Opinion of Young Specialists]. Kursk, South-West State University, 2015, pp. 158–161.
37. Ivanov V., Vashchenko S., Rong Y. Information Support of the Computer-aided Fixture Design System. Proc. of 12th Int. Conf. ICTERI'2016, Kyiv, Ukraine, June 21–24, 2016, CEUR-WS.org, online CEUR-WS.org/Vol-1614/paper\_37.pdf.

Поступила (received) 03.04.17

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Структурно-функціональне моделювання процесу проектування верстатних пристроїв / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, С. М. Ващенко, Й. Заяць, А. І. Кармаза // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 30–37. – Бібліогр.: 37 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Структурно-функціональное моделирование процесса проектирования станочных приспособлений / В. А. Иванов, В. Е. Карпусь, С. М. Ващенко, Й. Заяць, А. И. Кармаза // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 30–37. – Библиогр.: 37 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Structural-functional simulation of fixture design / V. Ivanov, V. Karpus, S. Vaschchenko, J. Zajac, A. Karmaza // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P. 30–37. – Bibliogr.: 37. – ISSN 2079-004X.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Іванов Віталій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету, м. Суми; тел.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

**Иванов Виталий Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университета, г. Сумы; тел.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

**Ivanov Vitalii Oleksandrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools of Sumy State University, Sumy; tel.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

**Карпуть Владислав Євгенович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків.

**Карпуть Владислав Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной механики, Национальной академии Национальной гвардии Украины, г. Харьков.

**Karpus Vladyslav Evhenovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering of National Academy of National Guard of Ukraine, Kharkiv.

**Ващенко Світлана Михайлівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету, м. Суми.

**Ващенко Светлана Михайловна** – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных наук Сумского государственного университета, г. Сумы.

**Vashchenko Svitlana Mykhailivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of Department of Computer Sciences of Sumy State University, Sumy.

**Йожеф Заяць** – кандидат технічних наук, професор, декан факультету виробничих технологій Технічного університету м. Кошице, м. Прешов.

**Йожеф Заяць** – кандидат технических наук, профессор, декан факультета производственных технологий Технического университета г. Кошице, г. Прешов.

**Jozef Zajac** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Professor, Dean of the Faculty of Manufacturing Technologies of Technical University of Kosice, Presov.

**Кармаза Андрій Іванович** – студент факультету технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету, м. Суми.

**Кармаза Андрей Иванович** – студент факультета технических систем и энергоэффективных технологий Сумского государственного университета.

**Karmaza Andrii Ivanovych** – MSc student of the Faculty of Technical Systems and Energy Efficient Technologies of Sumy State University, Sumy.