

УДК 621.91

**В.Є. Карпусь, професор, докт. техн. наук,**

**О.В. Котляр, старший викладач, канд. техн. наук,**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

*вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002*

*kotljar80@mail.ru*

**В.О. Іванов, старший викладач, канд. техн. наук**

*Сумський державний університет*

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

*ivanov\_vitalii@i.ua*

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ**

*Розглянуті питання автоматизованого підходу до багатокритеріальної оптимізації верстатних пристроїв та технологічних процесів в умовах багатоміністерського виробництва. Розроблено принцип формування множини конкуруючих варіантів компоновки верстатних пристроїв та алгоритмічну структуру системи синтезу. Зазначено основні напрямки розроблення методики автоматизованого вибору оптимальних рішень.*

**Ключові слова:** багатоміністерське виробництво, технологічна підготовка виробництва, багатокритеріальна оптимізація, автоматизоване проектування, технологічний процес, верстатний пристрій.

Машинобудування – одна з найважливіших галузей виробництва України, яка значно впливає на ефективність і прогрес майже у всіх сферах людської діяльності та охоплює понад 22% зайнятого промислово-виробничого персоналу.

Подальший розвиток України як самостійної держави з власною розвиненою машинобудівною індустрією можливий за рахунок впровадження інноваційних проектів, які, в першу чергу, сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності української машинобудівної продукції, що можливо завдяки скороченню часу на технологічну підготовку виробництва.

У сучасному машинобудуванні найбільша частка деталей, які отримують обробкою різанням, випускається в умовах багатоміністерського виробництва, що характеризується нестабільністю номенклатури й обсягів випуску продукції. У розвинених країнах частка машинобудівної продукції, яка випускається у цих умовах досягає 75–80%. Багатоміністерське виробництво характеризується широкою номенклатурою виробів, різноманітністю технологічних операцій та маршрутів обробки, частим переналадженням обладнання, а також складною організацією виробництва.

Сучасний рівень розвитку техніки характеризується розмаїтістю та підвищеною складністю конструкцій виробів машинобудування, в результаті чого кількість вузлів механізмів і деталей істотно збільшується, ускладнюються функціональні зв'язки, посилюються вимоги щодо виготовлення та складання. Ця тенденція призводить до ускладнення структури технологічних процесів (ТП) виготовлення деталей і вузлів виробів та підвищення трудомісткості проектування ТП, що відображається в певній послідовності виконання операцій механообробки, термообробки і т.д.

Робота підприємств в умовах ринкової економіки висуває на перший план необхідність забезпечення високої якості виробу при відносно низькій його вартості. Це у свою чергу призводить до підвищення вимог щодо точності виготовлення деталей та вузлів, визначає необхідність застосування дорогого обладнання та оснастки, що в остаточному підсумку є причиною збільшення витрат і подовження часу на конструкторсько-технологічну підготовку виробництва.

Для сучасного машинобудування характерні наступні основні тенденції:

- збільшення змінюваності випуску виробів через швидке розширення споживчого ринку;
- підвищення надійності та експлуатаційних характеристик виробів;
- зниження витрат на експлуатацію і ремонт;
- підвищення вимог до якості виробів, деталей і оброблюваних поверхонь.

Основним засобом підвищення якості виробів, скорочення термінів їх розроблення, забезпечення точності та стабільності виготовлення, а також забезпечення мінімальної собівартості є вдосконалення технічної підготовки виробництва за рахунок розвитку систем технологічного проектування, бо технологічне проектування – це головне завдання технічної підготовки виробництва, яке становить майже половину її трудомісткості.

Ефективне технологічне проектування може здійснюватися тільки на методичній основі оптимізації ТП, що базується на техніко-економічних принципах, які дозволяють розробляти та впроваджувати найбільш раціональні ТП із множини конкуруючих варіантів.

Згідно із цими принципами, обробка деталей повинна здійснюватися з найменшою трудомісткістю та мінімальною собівартістю за умови її виготовлення в необхідній кількості та в терміни, встановлені календарними виробничими планами. Реалізація вказаних вимог забезпечується багатоваріантністю проектування, у ході якого формуються альтернативні з технічних позицій варіанти та вибирається найвигідніший з них.

При традиційному проектуванні питання пошуку оптимального рішення найчастіше не є пріоритетним через те, що кількість детально проаналізованих варіантів невелика, а їх оцінювання виконується на основі інтуїції та досвіду проектувальника та лише в окремих випадках – порівнянням найбільш простих кількісних критеріїв.

Сьогодні завдання вибору оптимальних технологічних рішень стало вельми актуальним. Це обумовлено, з одного боку, неможливістю іншими засобами вдосконалити технологію, а з іншого – потенційними можливостями сучасної комп'ютерної техніки. Таким чином є сприятливі умови для розвитку та впровадження автоматизації технічної підготовки виробництва, у тому числі, для автоматизації проектування ТП механічної обробки деталей методами багатокритеріальної оптимізації. Відкрилися нові можливості для спрямованого пошуку ефективних технологічних рішень в області структурного та параметричного проектування технологічних систем.

Автоматизація проектування ТП потребує перегляду методів рішення багатьох завдань проектування у тому числі оптимізаційних, розроблення способів їх формалізації, кількісного опису та вибору критеріїв оптимальності. Як стимул для розроблення формальних методів пошуку технологічних рішень, автоматизація проектування сприяє застосуванню цих методів і у неавтоматизованому проектуванні.

Недостатність формального подання теоретичних положень технології машинобудування ясно позначилася в ході створення систем автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП). Переважний розвиток одержали системи, де проектування здійснювалося на основі уніфікованих (типових або групових) технологічних процесів або їх фрагментів. Головним фактором, що стримує створення універсальних САПР ТП, варто визнати недостатній розвиток технологічної теорії в області обґрунтованого прийняття рішень особливо на підставі багатокритеріальної оптимізації. Ті завдання, які в традиційному проектуванні вирішуються інтуїтивно, вимагають глибоких досліджень для виявлення логіки їх вирішення, встановлення інформаційних зв'язків між відповідними під задачами і т.д.

Забезпечення конкурентоспроможності продукції машинобудування вимагає створення сучасного високоефективного технологічного обладнання. Поява нових технологічних машин, транспортних засобів тощо призвело до широкого використання складних геометричних форм, які досить часто визначають їх основні характеристики. Необхідність в обробці складних поверхонь вимагає створення технологічного обладнання, що забезпечує високі показники продуктивності, гнучкості та точності обробки при необхідному рівні усіх інших показників, дотримання яких вимагають ринкові відносини.

При керуванні машинобудівним виробництвом у сучасних ринкових відносинах більше уваги варто приділяти аналізу ринкової позиції підприємства, визначенню місця його продукції у передбачуваних співвідношеннях цін та попиту і пропозиції. Відношення між технологічними засобами підприємства та його діловою стратегією повинне бути стратегічно зрівноважене, що полягає в обґрунтованому визначенні виду та кількості технологічних засобів, достатніх для виготовлення заданої номенклатури виробів.

Основним напрямком досягнення «стратегічної рівноваги» є розроблення технологічно обґрунтованих рекомендацій, які стосуються розширення номенклатури та технологічних можливостей металообробних верстатів і технологічної оснастки. Ці рекомендації повинні розроблятися з урахуванням існуючих та перспективних технологій і дозволити створювати нові види устаткування із закладеними резервними можливостями за продуктивністю, гнучкістю, точністю та іншими показниками. Одним з напрямків підвищення продуктивності обробки та розширення технологічних можливостей токарних верстатів із ручним керуванням, а також верстатів із ЧПК є впровадження багаторізевої обробки з використанням багаторізових тримачів [1].

Таким чином, до машинобудівного виробництва висуваються суперечливі вимоги: забезпечення необхідної якості продукції, зниження собівартості виготовлення та часу технологічної підготовки виробництва. Застосування гнучких виробничих систем і виробничих систем змінної конфігурації у виробництві висуває додаткові умови щодо скорочення часу проектування ТП. Прагнення одночасно досягти бажаної якості виробу при найменшій його собівартості є надзвичайно складною проблемою, при вирішенні якої доводиться зіштовхуватися з наступними проблемами:

- формалізованим описом багаторівневої ієрархічної структури ТП та його структурної і параметричної оптимізації;
- оцінки кількісних показників виробництва на різних етапах виготовлення виробів (заготівельної, механообробки, складання);

- встановлення критеріїв оптимальності ТП, які найбільш повно характеризують діяльність підприємства;
- недостатньою розробленістю систем моделювання ТП, що дозволяють інтегрувати конструкторську та технологічну інформацію.

Найбільш ефективним видом металорізального обладнання, яке використовується в умовах багатомономенклатурного виробництва, є багатоцільові верстати з ЧПК, які забезпечують автоматизацію процесу обробки, концентрацію технологічних переходів, можливість реалізації складних просторових переміщень різальних інструментів, швидке переналадження, багатостантне обслуговування та ін.

Розвиток сучасних технологій обробки деталей обумовлює вдосконалення конструкцій технологічної оснастки, витрати на проектування та виготовлення якої досягають 80% від загальної трудомісткості. Найбільш складною та трудомісткою у виготовленні частиною технологічної оснастки є верстатні пристрої (ВП), які складають 70–80% загального обсягу технологічної оснастки. Саме із конструкціями ВП пов'язані перспективні напрямки вдосконалення технологічної підготовки виробництва, а саме, впровадження системи автоматизованого вибору ВП, що відповідно до аналізу сучасних пошукових досліджень є необхідним та першочерговим кроком.

Аналіз структури технологічної підготовки виробництва показав, що 80–90% часу технологічної підготовки виробництва витрачається на проектування та виготовлення ВП, які призначені для базування та закріплення заготовок під час обробки на верстатах. При цьому витрати на виготовлення ВП досягають 10–20% від вартості металорізального обладнання, що свідчить про важливу роль ВП у забезпеченні випуску конкурентоспроможної продукції.

Вибір найвигіднішого компонування ВП доцільно здійснювати на основі багатокритеріальної оптимізації, яка передбачає формування конкуруючих варіантів компонувань ВП [2], за схемою, наведеною на рисунку 1.

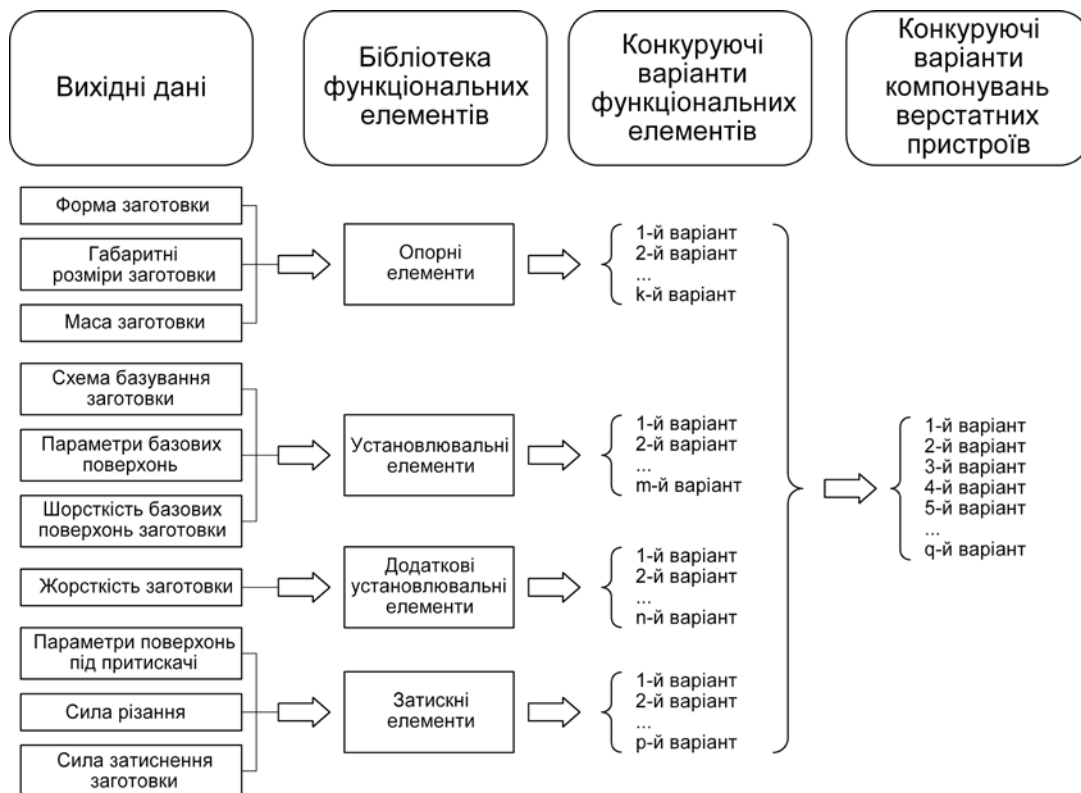


Рисунок 1 – Схема формування конкуруючих варіантів компонувань верстатних пристроїв

На основі вихідних даних, які отримуємо з робочого креслення та операційного ескізу деталі, що підлягає обробці на даній операції, технологічної документації та завдання на проектування ВП, а також умов виробництва можна визначити функціональні елементи, які необхідні для реалізації теоретичної схеми установлення заготовки. Можливі конструкції елементів ВП містяться у бібліотеці функціональних елементів, яку сформовано із груп елементів, що виконують однакові функції у конструкції ВП, наприклад, до групи опорних елементів належать плити та кутники; до установлювальних елементів – опорні пластини, опори, призми, установлювальні пальці; до допоміжних

установлювальних елементів – самовстановлювальні та підвідні опори; до затискних елементів – різні конструкції притискачів, планок, важелів тощо.

Вирішення проектно-конструкторських робіт пов'язане з вибором типових рішень, які визначаються сукупністю деякої множини параметрів та умов. Як правило, такі задачі мають складні логічні взаємозв'язки між умовами та рішеннями, які вони визначають. Для наочного і компактного представлення даних успішно застосовуються табличні методи рішення, які дозволяють скоротити час при постановці задачі, програмуванні, а також при виявленні можливих помилок і некоректностей. Для рішення задач найбільш поширеними табличними методами є таблиці рішень, які мають ряд важливих переваг перед іншими методами, зокрема при автоматизованому проектуванні. Таблиці рішень досить просто складаються, легко перевіряються на повноту, суперечливість і надмірність інформації. При цьому усуваються джерела можливих похибок і встановлюється мова, зручна для людини й одночасно близька до мови сучасних ЕОМ. Таблиці рішень дозволяють легко змінювати значення параметрів, доповнювати додатковою інформацією та рішеннями.

Бібліотека функціональних елементів сформована на основі таблиць рішень для кожної групи функціональних елементів: опорних, установлювальних, допоміжних установлювальних та затискних. Конструкції опор відрізняються за функціональними поверхнями, якістю базових поверхонь заготовки, видом головки опори, величиною максимального навантаження на опору, величиною регулювання за висотою, довжиною і кутом нахилу, а також ступенем автоматизації переналагодження.

Вибір призм і установлювальних пальців здійснюється відповідно до стану базової поверхні заготовки, діаметрів базових поверхонь, способу та ступеню автоматизації процесу переналагодження. Затискні елементи обирають відповідно до таких параметрів: ступінь механізації процесу переналагодження, діапазон регулювання, мінімальна і максимальна висота заготовки, яку здатний закріпити затискний елемент, величина максимальної сили закріплення, а також вага.

Таким чином, кожна група функціональних елементів містить конструкції єдиного функціонального призначення, які відрізняються між собою за технічними показниками, а отже, мають певну сферу застосування. Для ідентифікації елементів у бібліотеці кожний елемент має код [3].

Ураховуючи вихідні дані та технічні характеристики елементів для кожної з функціональних груп, можна сформулювати певну кількість конкуруючих варіантів, причому їх число для різних груп буде різним. Так, у загальному випадку з групи опорних елементів можна вибрати від одного до  $k$  варіантів опорних елементів,  $m$  варіантів установлювальних елементів,  $n$  варіантів допоміжних установлювальних елементів та  $p$  варіантів затискних елементів.

На основі вибраних окремих елементів можна створити множину конкуруючих варіантів компонувань ВП, загальна кількість  $q$  яких дорівнює добутку варіантів для кожної групи:

$$q = k \cdot m \cdot n \cdot p.$$

Багатокритеріальна оптимізація передбачає розроблення системи конкуруючих варіантів [3], причому при ручному формуванні множини конкуруючих варіантів спостерігаються великі витрати часу, тому найдоцільніше цей процес автоматизувати. Для цього запропоновано алгоритмічну структуру системи вибору оптимальних компонувань ВП (рисунок 2), яка складається з бази даних та трьох модулів: вихідних даних, інформаційно-пошукового, розрахункового.

На вибір ВП впливає велика кількість факторів, основними з яких є: конструктивні (геометрична форма, розміри, маса, жорсткість деталей і т.д.); технологічні (характер виконуваної операції, вид металорізального обладнання, різального інструмента, схема базування та закріплення заготовки тощо); виробничі (тип виробництва, річна програма випуску деталей, число деталей у партії і т.д.); економічні; інші (ергономічні, естетичні характеристики ВП та ін.).

Основними функціями бази даних є: накопичення, уточнення, вдосконалення, зберігання та надання інформації про існуючі розробки відповідно до потреб, що виникають при оснащенні операції. База даних системи автоматизованого синтезу компонувань ВП складається з таких бібліотек: функціональних елементів; нормативно-довідкової інформації; відомостей про металорізальне обладнання та інструмент. У бібліотеці нормативно-довідкової інформації містяться таблиці допусків та посадок, якості точності, дані про шорсткість поверхонь, норми часу на обробку деталей, складання компонувань ВП та переналагодження елементів, нормативи режимів різання.

Бібліотека відомостей про металорізальне обладнання та інструмент містить технічні характеристики металорізального обладнання, зокрема характеристики робочої зони та посадкових місць верстатів, на яких повинен установлюватися ВП.

Для свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів, наприклад, необхідно знати такі параметри: розміри робочого стола; відстань між пазами стола; відстань від торця шпинделя до стола у крайньому верхньому положенні. Крім того, до бібліотеки занесені рекомендації щодо вибору різального інструмента залежно від умов та параметрів обробки поверхонь деталей.

На сьогоднішній день основними розробниками таких систем у світі є наукові лабораторії США, Китаю, Сінгапуру, які спеціалізуються на створенні систем ВП для операцій механічної обробки заготовок, складальних операцій, зварювання, штампування.

Основними завданнями САFD-систем (computer-aided fixture design), більшість яких призначена для операцій механічної обробки заготовок, є:

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

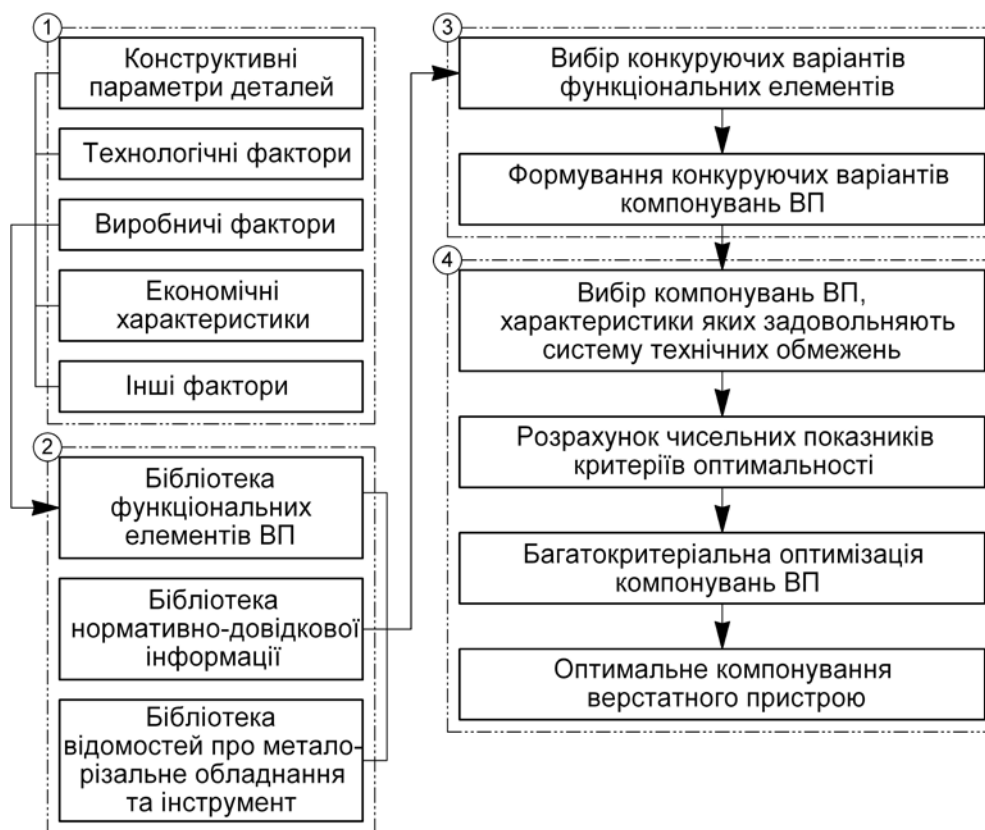


Рисунок 2 – Алгоритмічна структура системи синтезу компонувань верстатних пристроїв:  
1 – модуль вихідних даних; 2 – база даних; 3 – інформаційно-пошуковий модуль; 4 – розрахунковий модуль

Враховуючи, що компонування ВП є технічними системами, які відрізняються за рівнем гнучкості, технологічними можливостями та вартістю, ефективний вибір найвигіднішого серед множини конкуруючих варіантів доцільно здійснювати за допомогою багатокритеріальної оптимізації.

Подальший розвиток САFD-систем можливий, перш за все, за рахунок вдосконалення їх функціональності:

- впровадження математичного апарату для багатокритеріального вибору найвигідніших компонувань ВП з числа конкуруючих варіантів, причому перелік та кількість критеріїв можуть змінюватися відповідно до заданих умов виробництва;
- формування бібліотеки функціональних елементів на основі системи універсально-збірних переналагоджуваних пристроїв [4], як найефективнішої для умов багатонаменклатурного виробництва;
- виконання скінченноелементного аналізу компонувань ВП з урахуванням динамічних характеристик для оцінки похибок, які виникають внаслідок пружних деформацій під дією сил різання;
- оснащення САFD-систем модулем розмірного аналізу 3D-моделей компонувань ВП з метою врахування похибки виготовлення функціональних елементів ВП при подальших розрахунках;
- розроблення 3D-анімацій процесів складання та налагодження компонувань ВП для мінімізації витрат часу на підготовку ВП до роботи.

Таким чином, впровадження системи автоматизованого вибору ВП дозволить скоротити матеріальні витрати та час на технологічну підготовку виробництва, та як результат – підвищити конкурентоспроможність як машинобудівної продукції, так і машинобудівних підприємств України в цілому.

**Висновки:**

1. Важливим напрямком підвищення ефективності технологічних систем є розроблення методичної основи багатокритеріальної оптимізації на усіх рівнях технологічного проектування з урахуванням ринкових умов і з можливістю її інтегрування до систем автоматизованого проектування, а також на її підставі розроблення технологічних рекомендацій стосовно розвитку наукових основ обробки деталей та функціональних можливостей металообробного обладнання.

2. Розроблена структура вибору оптимального компоновання верстатного пристрою, яка базується на багатокритеріальній оптимізації, дозволяє обґрунтовано вибрати найвигідніше компоновання верстатного пристрою серед множини конкуруючих варіантів для певних виробничих умов, а отже, сприяє скороченню часу на технологічну підготовку виробництва та дозволяє оцінити точнісні можливості, економічну ефективність та працездатність компоновань верстатних пристроїв.

***Бібліографічний список використаної літератури:***

1. Karpus V.E. Multicutter machining on controlled lathes / V.E. Karpus, A.V. Kotlyar // Russian Engineering Research. — 2007. — Vol. 27, No. 12. — pp. 884—887.

2. Karpus V.E. Choice of Optimal Construction of Modular Reusable Fixture / V.E. Karpus, V.A. Ivanov // Russian Engineering Research. — 2012.— Vol. 32, No. 3.—pp. 213—219.

3. Карпусь В.Е. Выбор оптимальной компоновки универсально-сборных переналаживаемых приспособлений / В.Е. Карпусь, В.А. Иванов // Вестник машиностроения. — 2012. — № 3. — С. 3—9.

4. Карпусь В.Е. Универсально-сборные переналаживаемые приспособления / В.Е. Карпусь, В.А. Иванов // Вестник машиностроения. — 2008. — № 11. — С. 46—50.

*Надійшла до редакції 29.02.2012 р.*

**Карпусь В.Е., Котляр А.В., Иванов В.А. Автоматизация многокритериального выбора оптимальных решений**

Рассмотрены вопросы автоматизированного подхода к многокритериальной оптимизации станочных приспособлений и технологических процессов в условиях многономенклатурного производства. Разработаны принцип формирования множества конкурирующих вариантов компоновок станочных приспособлений и алгоритмическая структура системы синтеза. Указаны основные направления по разработке методик автоматизированного выбора оптимальных решений.

**Ключевые слова:** многономенклатурное производство, технологическая подготовка производства, многокритериальная оптимизация, автоматизированное проектирование, технологический процесс, станочное приспособление.

**Karpus V.E., Kotliar A.V., Ivanov V.A. Computer-aided multicriteria choice of optimal solutions**

Questions of computer-aided approach of multicriteria optimization of fixtures and manufacturing processes in multiproduct manufacture are described. Principle of generating of variety of competitive variants of fixtures and algorithmic structure of synthesis system are developed. Main trends in developing methods of computer-aided choice of optimal solutions are highlighted.

**Keywords:** multiproduct manufacture, process-layout preparation, multicriteria optimization, computer-aided design, manufacturing process, fixture.