

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

*Пермяков Олександр Анатолійович*

УДК 621.9.06

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОМПОНЕТИКИ  
АГРЕГАТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2002

Дисертацією є рукопис  
Робота виконана на кафедрі “Технологія машинобудування і металорізальні верстати”  
Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства  
освіти та науки України, м.Харків

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
*Тимофієв Юрій Вікторович*,  
Національний технічний університет “Харківський  
політехнічний інститут”, завідувач кафедри “Технологія  
машинобудування і металорізальних верстатів”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
*Арпентьєв Борис Михайлович*,  
Українська інженерно-педагогічна академія (м.Харків),  
завідувач кафедри “Технологія машинобудування”;  
доктор технічних наук, професор  
*Михайлов Олександр Миколайович*,  
Донецький Національний технічний університет, завідувач  
кафедри “Технологія машинобудування”;  
доктор технічних наук, професор  
*Петраков Юрій Володимирович*,  
Національний технічний університет України “Київський  
політехнічний інститут”, завідувач кафедри “Технологія  
машинобудування”

Провідна установа: Харківський науково-дослідний інститут технології  
машинобудування, Міністерство промислової політики України,  
м.Харків

Захист відбудеться 13 червня 2002 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д  
64.050.12 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за  
адресою:  
61002, м.Харків, вул.Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету  
“Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий 11 травня 2002 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
М.Д.

Узунян

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Удосконалення машинобудівного комплексу України, його технічне переозброєння потребує підвищення якісних показників технологічного устаткування, що знову створюється і модернізується. Сучасні верстати і системи повинні бути високопродуктивними, володіти технологічною гнучкістю за рахунок автоматизації, забезпечувати можливо низьку собівартість обробки деталей, мати малий строк окупності капітальних вкладень.

Найбільш перспективним видом технологічного устаткування, що задовольняє більшості вимог, є агрегатні верстати і технологічні системи, які створюються за агрегатно-модульним принципом. Агрегатовані технологічні системи механообробки (АТСМ) і агрегатні верстати (АВ) широко поширені в українському машинобудуванні й машинобудуванні найбільш розвинених промислових країн, складаючи основу високоорганізованих і найбільш ефективних виробництв.

За тривалий період розвитку агрегатованого устаткування розроблені загальні принципи проектування технологічних процесів обробки деталей у таких системах, створені параметричні ряди конструкцій уніфікованих вузлів і агрегатів, сформовані основні компоновочні схеми. Однак потенційні можливості, закладені в агрегатно-модульному принципі побудови верстатів і систем, розкриті ще не повністю. Так, проблема розробки найбільш раціональних компоновок багатопозиційних багатоінструментних АТСМ досліджена в найменшій мірі, оскільки задача вибору варіанту взаємного просторового розташування вузлів і елементів є багатофакторною різноманітною задачею, що найтіснішим образом пов'язано із технологічною задачею синтезу маршруту обробки деталі. Це веде до різноманіття компоновок АТСМ. З одного боку, це обумовлено різноманіттям геометричних форм деталей, що оброблюються, габаритними розмірами, точністю і шорсткістю формотворених поверхонь, точністю координатних розмірів, необхідною продуктивністю, а з іншого боку, відсутністю загальної теорії компоновки багатопозиційних технологічних систем. Наслідком чого є надмірно висока питома металоємкість і енергооснащеність, що притаманна АТСМ.

Питання вибору раціональної компоновки металорізального устаткування в сучасних умовах найбільш важливі, тому що, по-перше, визначають основні споживчі й експлуатаційні характеристики; по-друге, дозволяють керувати трудомісткістю виготовлення, рівнем металоємкості, енергооснащення, фондівіддачі і т.і. Таким чином, розробка моделі компоновки багатопозиційних АТСМ з урахуванням технологічних особливостей при їх створенні, методик прийняття ефективних проектних рішень, що виключають метод проб і помилок при проектуванні в умовах відсутності етапу виготовлення дослідного зразка, є актуальною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації є частиною наукового напрямку кафедри технології машинобудування і металорізальних верстатів Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", пов'язаного з підвищенням ефективності проектування, виготовлення й експлуатації агрегатованого металорізального устаткування, який входить в комплексні цільові науково-технічні програми України КЦНТП-14 і КЦНТП-22. Робота виконувалась в рамках договору про творче співробітництво "Удосконалювання структури і якості створення агрегатних верстатів" між кафедрою технології машинобудування і металорізальних верстатів НТУ "ХП" із Харківським заводом агрегатних верстатів і Спеціальним конструкторським бюро агрегатних верстатів, деякі дослідження виконувались у рамках договору по науково-технічне співробітництво кафедри технології машинобудування і металорізальних верстатів НТУ "ХП" і

Державним підприємством ХМЗ“ФЕД” (м.Харків) “Удосконалення технологічних процесів виготовлення товарів народного споживання при зміні об’єктів виробництва шляхом впровадження елементів ГВС та методів перекомпонування агрегатних верстатів”.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – підвищення техніко-економічної ефективності багатопозиційних АТСМ шляхом розширення технологічних можливостей, зменшення габаритів і металоємкості за рахунок структурно-параметричної оптимізації технологічних і конструкторських компоновок систем механообробки і їхніх елементів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати системний аналіз технологічних принципів створення складноструктурних АТСМ;
- провести статистичні дослідження структурово-параметричних характеристик багатопозиційних АТСМ;
- провести дослідження процесу проектування технологічного обладнання, що створюється за принципом агрегування;
- розробити методи кількісної оцінки варіантів компоновки АТСМ на основі комплексних критеріїв, які враховують технологічні і конструкторські фактори, що впливають на продуктивність, економічність, компактність і металоємкість;
- розробити методіку спрямованого проектування і перекомпонування багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки на основі узагальненої моделі компоновки;
- розробити компоновочні схеми багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовок, що мають структурну надмірність і допускають переналагодження при зміні об’єкта обробки;
- розробити комплекс алгоритмічного й інформаційного забезпечення для автоматизованого композиційного проектування АТСМ;
- виконати перевірку розроблених теоретичних положень, моделей і методик на дійсних задачах проектування АТСМ і оцінити їхню економічну ефективність.

*Об’єкт дослідження* – процес проектування технологічних та конструкторських компоновок АТСМ.

*Предмет дослідження* – багатопозиційні багатоінструментні компоновки АТСМ із круговим транспортуванням заготовки.

*Методи дослідження.* Методи системного аналізу і положення теорії складних систем, системотехніки, теорії множин використовувалися для дослідження процесу проектування АТСМ, аналізу їхніх структур і параметрів. Технологічні методи диференціації і концентрації операцій покладені в основу аналізу і синтезу способів суміщення технологічних переходів при виборі раціональних компоновок АТСМ. Основи проектування пристроїв і теорія базування застосовувалися для систематизації компоновок і розробки методів автоматизованого проектування установочно-затискних пристроїв АТСМ. Методи математичного моделювання й оптимізації покладені в основу розробки математичних моделей елементів, що компонуються, і критеріїв компактності для автоматизації проектування компоновок АТСМ. Для автоматизації процесу синтезу просторового компонування багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки, представленої координатними системами елементів, що компонуються, застосований математичний апарат афінних перетворень. Методи прийняття технічних рішень використані для вироблення правил спрямованого автоматизованого проектування компоновок АТСМ.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На основі системного і статистичного аналізу технологічних процесів обробки, компоновочних рішень та принципів проектування АТСМ розроблені основні методологічні положення теорії композиційного проектування технологічних систем даного класу, що дозволяють підвищити техніко-економічні показники, поширювати технологічні можливості агрегатованого устаткування за рахунок запропонованої оптимізації технологічного впливу в процесі обробки, просторово-структурних і параметричних характеристик. Ці положення ґрунтуються на:

- використанні сукупності технологічних та компоновочних переваг принципу агрегування при створенні технологічних систем механообробки різанням, що виключають притаманні АТСМ недоліки;
- композиційному проектуванні АТСМ, як складної системи, і використанні критеріїв економічності;
- кількісній оцінці варіантів компоновки АТСМ із використанням нового комплексного показника компактності - питомої концентрації операції;
- спрямованому синтезі просторової компоновки АТСМ із використанням апарату афінних перетворень координатних систем і оптимізації проектних рішень за критеріями компактності на різних стадіях деталізації проекту.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі виконаних узагальнень, теоретичних досліджень і розроблених математичних моделей підготовлений комплекс методичного, інформаційного, алгоритмічного і програмного забезпечення процесу проектування компоновки багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки, що містить в собі: загальну методику спрямованого композиційного проектування складноструктурних АТСМ; методику проектування оптимальних компоновки АТСМ за критеріями компактності й економічності; методику просторово-структурно-параметричної оптимізації частин АТСМ, що компонуються, за критеріями компактності; інформаційне, алгоритмічне і програмне забезпечення методик синтезу інструментальних налагоджень, установочно-затискних пристосувань і загального компоновки АТСМ.

У рамках договору про творче співробітництво “Удосконалювання структури і якості створення агрегатних верстатів” між кафедрою технології машинобудування і металорізальних верстатів НТУ“ХПІ” з Харківським заводом агрегатних верстатів (ХЗАВ) і Спеціальним конструкторським бюро агрегатних верстатів (СКБ АВ) випробувана і впроваджена в практику проектування методика вибору оптимального компоновки при конструюванні багатопозиційних АВ. Загальний економічний ефект, досягнутий за рахунок зниження собівартості створюваних верстатів і збільшення прибутку ХЗАВ склав близько 12 000 – 15 000 гривень на один верстат у залежності від структурної складності.

У рамках творчого співробітництва кафедри технології машинобудування і металорізальних верстатів НТУ“ХПІ” із ДП ХМЗ“ФЕД” розроблені проектні методики компоновки АТСМ були використані при переналагодженні АВ на ділянці товарів народного споживання, що дозволило скоротити час і трудомісткість технологічної підготовки виробництва на 10-15%.

Результати досліджень, виконаних у дисертації, знайшли відображення в навчальному процесі Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” при викладанні дисциплін “Металорізальне устаткування”, “Мехатроніка” і “Технологія верстатобудування” для студентів спеціальностей 7.902.202 і 7.902.203. Елементи програмного забезпечення використовуються при курсовому і дипломному

проектуванні.

**Особистий внесок здобувача.** Результати досліджень отримані автором самостійно. Постановка задач дослідження й аналіз деяких результатів виконані з науковим консультантом і частково зі співавторами публікацій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися, обговорювалися й одержали позитивну оцінку на: міжнародній науково-методичній конференції “Автоматизація конструювання виробів і проектування технологічних процесів у машинобудуванні” (6-7 жовтня 1994 р., м.Суми); міжнародній науково-методичній конференції “Автоматизація проектування і виробництва виробів у машинобудуванні” (4-6 жовтня 1995 р., м.Київ); міжнародній НТК “Прогресивна техніка і технологія машинобудування” (1995 р., м.Донецьк); міжнародній НТК (3-5 травня 1994 р., м.Харків); міжнародній НТК Micro-CAD-97 (травень 1997 р., м.Харків); міжнародній НТК Micro-CAD-98 (травень 1998 р., м.Харків); міжнародній НТК Micro-CAD-99 (травень 1999 р., м.Харків); міжнародній НТК “Сучасні технології, економіка й екологія в промисловості, на транспорті й у сільському господарстві” (6-12 вересня 1999 м., м.Алушта); міжнародній НТК “Машинобудування і техносфера на рубежі ХХІ століття” (13-18 вересня 1999 р., м.Севастополь); міжнародній НТК “Проблеми теорії і практики технології машинобудування, механічної і фізико-технічної обробки” (22-26 травня 2000 р., м.Харків); міжнародній НТК “Сучасні технології, економіка й екологія в промисловості, на транспорті й у сільському господарстві” (4-10 вересня 2000 р., м.Алушта); міжнародній НТК “Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві” (23-24 жовтня 2001 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертації викладені в 28 статтях, серед яких 22 – у фахових виданнях.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 6 розділів, висновків та 3 додатків. Повний обсяг дисертації складає 387 сторінок, з них 86 ілюстрацій по тексту, 42 ілюстрації на 42 сторінках, 3 таблиці по тексту, 23 таблиці на 23 сторінках, 3 додатка на 45 сторінках, 235 використаних літературних джерел на 22 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність розглянутої проблеми, сформульована мета дисертаційної роботи, визначені її наукова новизна і практична цінність.

**У розділі 1** наведено сучасний стан проблеми, виконаний огляд літератури по темі дисертації і сформульовані її мета і задачі. Сучасне технологічне устаткування утворює велику безліч різноманітних компоновочних схем, конструктивних форм і розмірів. Основу різноманіття компоновань верстатів завжди визначало різноманіття кінематичних структур, які забезпечують необхідний набір формотворних рухів. Практикою верстатобудування сформована сукупність базових компоновань верстатів і систем. Верстати, як і більшість технічних об'єктів, пройшли період уніфікації. Це привело до виникнення ідеї створення технологічного устаткування на базі загальних цільових вузлів-агрегатів. Значний внесок у компонентіку верстатів, теорію і практику створення агрегатованого металорізального устаткування внесли О.И.Аверьянов, Н.С.Ачеркан, Л.С.Брон, А.П.Владзиєвський, Ю.Д.Врагов, Х.Гьобель, А.И. Дашенко, Г.И.Мела мед, А.С.Проников, В.Э.Пуш, Д.Н.Решетов, Ж.Э. Тартаковський, В.Д.Хицан, Б.И.Черпаков, Г.А.Шаумян і інші провідні вчені.

Принциповим розходженням у підходах до компонентіки універсальних верстатів (токарних, фрезерних, свердлильних і т.і.) і верстатів, створюваних за

агрегатно-модульним принципом, є те, що перші створюються для обробки визначеного класу деталей, що характеризуються конкретним рухом формоутворення (деталі тіл обертання і т.і.), а АТСМ створюються для обробки деталей практично необмеженої номенклатури. Оскільки універсальні верстати здебільшого однопозиційні, основну компоновку верстата визначають взаємне розташування і характер переміщення вузла деталі (шпіндельний вузол, стіл і т.і.) і вузла інструмента (супорт, інструментальний шпіндель і т.і.), при цьому число різних сполучень невелике і вони легко піддаються класифікації. При компонованні АТСМ стоїть задача технічної реалізації складних технологічних структур з великою варіантністю групування і розподілу безлічі технологічних переходів обробки деталей. У процесі розвитку технології машинобудування як науки, і, зокрема, теорії продуктивності, саме необхідність реалізації різних структур виконання технологічних операцій призвела від простих одношпіндельних одноінструментних компоновань верстатів до різноманітних компоновань складної структури. Високопродуктивні структури конструктивно знайшли своє втілення в агрегатних верстатах і автоматичних лініях і досягли своєї межі в роторних і роторно-конвеєрних системах.

Відмінною рисою АТСМ є висока концентрація технологічного впливу, що досягається за рахунок використання усіх відомих у технології машинобудування методів концентрації операцій: обробка комбінованим інструментом співвісних поверхонь; багатоінструментна обробка групи поверхонь з паралельними вісями; багатопозиційна обробка, багатомісна і багатостороння обробка (рис.1).

Питанням дослідження, моделювання, формалізації й автоматизації процесів проектування, аналізу і синтезу технологічних систем присвячено роботи А.П.Волощенко, А.М.Гильмана, В.С.Гусарева, Б.Н.Ігумнова, В.Є.Карпуся, В.Д.Цветкова, Д.В.Чарнко, Г.Н.Темчина, Ю.В.Тимофієва та інших вчених. Аналіз цих робіт дозволяє говорити про те, що теорія технологічних компоновань (ТК) АТСМ одержала значний розвиток. Розробка ТК (відносного суміщення в часі технологічних переходів) є першою компоновальною задачею, що розв'язується на ранніх етапах проектування АТСМ. У залежності від поставлених цілей структурно-параметрична оптимізація технологічного впливу може виконуватися за різними критеріями: основним часом переходу, що лімітує, приведеною інтенсивністю обробки, інтенсивністю формоутворення, приведеними витратами, технологічною собівартістю обробки і т.і. Зі сформованої множини варіантів ТК, що забезпечують ідентичну якість обробки, вибирається оптимальний за прийнятим критерієм варіант чи виконується ранжирування декількох конкуруючих варіантів, які проробляються надалі.

Огляд літератури показав, що наступні етапи синтезу АТСМ, зокрема, питання розробки раціональних конструкторських компоновань (розміщення в просторі інструментів, вузлів і агрегатів, що реалізують набір технологічних переходів) досліджені в найменшій мірі. При цьому за високу концентрацію обробки, що досягається при синтезі ТК АТСМ, розплачуються істотним завищенням питомої металоємкості (що приходиться на одиницю потужності приводів верстата) і завищеною енергооснащеністю. Аналіз розподілів дослідженої вибірки АВ середнього розміру показав, що при середній масі 6-7 тонн середня собівартість кілограма ваги АВ складає 3,5 карбованці (у цінах до 1990 року) проти 0,7 карбованця в універсальних верстатів аналогічної маси (рис.2). Порівняння АВ за зазначеними показниками з верстатами універсальними не на користь перших, хоча вихідні посилки до їхнього створення повинні давати іншу пропорцію.

При створенні АТСМ найбільш яскраво виявляються об'єктивні протиріччя між прагненням реалізувати технологічний вплив з максимальною концентрацією, необхідністю забезпечення максимальної продуктивності обробки з необхідною точністю при мінімальній енергооснащеності і металоємкості. Подолання таких протиріч можливо тільки при використанні методів оптимального проектування. Задача оптимізації технологічного впливу для багатопозиційних багатоінструментних верстатів – це в першу чергу задача оптимізації компоновочних рішень (як при суміщенні в часі, так і просторовому суміщенні переходів у технологічній системі).

Іншою особливістю обробки на АВ є обмеженість об'єму зони обробки. Об'єм зони обробки може бути охарактеризований питомим об'ємом  $V_{\text{пит}}$  (відношення об'єму зони обробки і об'єму верстата). Зіставлення груп верстатів по цьому показнику показує, що спеціальні АВ мають найбільш жорсткі межі зони обробки (рис.3). Висока концентрація обробки при малому питомому об'ємі зони обробки – відмінна риса АТСМ. Ця властивість дозволила надалі в даній роботі сформулювати систему критеріїв оцінки компоновочних рішень при проектуванні багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки.

**У розділі 2** виконаний системний аналіз компонувань і процесу проектування АТСМ.

Проблема досягнення оптимального рішення при проектуванні складних систем, подібних АТСМ, зв'язана з необхідністю узгодження локальних проектних рішень, прийнятих на різних рівнях розробки проекту. При традиційному підході проектування АТСМ, як складної системи, починається з евристичного чи емпіричного вибору деякої можливої структури (компоновочної схеми) системи з наступною підготовкою технічних пропозицій на розробку її елементів (рис.4). Технологія проектування компонувань АТСМ, яка передбачає децентралізовану розробку елементів, що комопонуються, з наступним централізованим корегуванням, зветься технологією декомпозиційного проектування.

Однією з основних проблем, що виникають при реалізації цієї технології проектування, є забезпечення таких координуючих впливів на проектні рішення, що приводили б до досягнення оптимального рішення на рівні системи в цілому. Вибір принципу здійснення цих координуючих впливів залежить від прийнятої структури підпорядкованості розроблювачів проекту і кваліфікації кожного з них.

Необхідність здійснення частих координуючих впливів на проектні рішення і їхнє узгодження в остаточному підсумку підвищує трудомісткість проектування. Аналіз процесу проектування спеціальних АВ у Харківському СКБ АВ показав, що при суміщенні робіт середня тривалість проектування складала 29 днів, при цьому, на узгодження проектних рішень йшло 5-6 днів. При середній сумарній (не суміщеній) тривалості проектування 51 день на розробку технологічного компонування (креслення обробки, інструментального налагодження, спеціального інструмента, карт налагодження силових агрегатів) приходилося 11 днів, вибір уніфікованих елементів і виконання креслень їхньої доробки - 5 днів, проектування оригінальної частини (складальні креслення установочно-затискних пристроїв, шпindelних насадок і коробок, монтажного шаблону) - 15 днів, розробку конструкторського компонування (креслення загального виду АВ, вузлів і систем) – 10 днів.

Компоновочні роботи, що важкоформалізуються, при проектуванні АТСМ складають до половини загальної трудомісткості проектування.

У загальному випадку система координації процесу проектування складної системи, що подібна АТСМ, відповідає кібернетичним системам так званого гермейєровського



типу, характерною ознакою яких є наявність на кожному рівні ієрархії власних цілей при наявності загальної мети. Для забезпечення оптимального керування в таких системах необхідно володіти інформацією про всі можливі компроміси між усіма співвиконавцями з урахуванням усього різноманіття припустимих локальних рішень. На базі даного підходу виконувались спроби автоматизації проектування АВ, для чого процес проектування розбивався на ряд послідовних локальних підзадач з різними для кожної (об'єктивно) функціями мети. Це призводило до того, що одержувані оптимальні (чи кращі з декількох конкуруючих) варіанти технологічного компонування (за критерієм собівартості) при їхній конструкторській реалізації давали в результаті не кращі компонування АВ у цілому (за критеріями металоємності й енергооснащеності). З теорії проектування складних систем відомо, що автоматизація проектування на базі декомпозиційного підходу недоцільна, тому що не дозволяє вирішити проблему оптимального проектування системи в цілому. Потрібен перехід на іншу технологію проектування – спрямоване формування оптимальної структури складної системи з заданими властивостям елементів, що можуть змінювати свої параметри і конструктивне виконання в інтересах оптимізації системи, що розроблюється. Такий підхід до проектування складних систем використовує зворотній (у порівнянні з декомпозиційним проектуванням) принцип організації операцій підготовки і прийняття рішень. Цей метод зветься композиційним проектуванням (рис.5).

Для здійснення композиційного проектування необхідно володіти базою знань, що містить математичні моделі елементів, які використовуються для їхньої технічної реалізації, а також методи оптимального просторово-структурно-параметричного компонування з них АТСМ. Створенню бази знань для можливості здійснення автоматизованими методами самоорганізації оптимальної структури АТСМ передував системний аналіз компонувань АВ.

У практиці рішення різноманітних задач аналізу і синтезу складноструктурних АТСМ використовувалися різні критерії ефективності. Формування тих чи інших критеріїв (технологічних чи техніко-економічних) визначалися формулюванням мети. Від критерію потрібна як можна більша схожість з метою, щоб оптимізація за цим критерієм відповідала максимальному наближенню до мети. Варто згадати про причини багатокритеріальності задач вибору, що частіше за все зв'язані не з множинністю цілей, а з тим, що сформульовану мету рідко вдається виразити одним критерієм, хоча до цього звичайно прагнуть.

Для порівняння і добору альтернатив при компонуванні багатопозиційних АТСМ необхідно було знайти критерії, які б, по-перше, дозволяли оцінити варіанти суміщення в часі і просторового суміщення технологічних переходів в АТСМ, а по-друге, відкривали можливості для висування нових альтернатив. Серед найрізноманітніших критеріїв ефективності, що впливають на оцінку результатів компонування АТСМ – технологічних, техніко-економічних та інших, геометричні критерії можуть бути обрані по ряду розумінь. У більшості випадків металоємність АТСМ прямо залежить від їхнього об'єму і габаритів, а трудомісткість виготовлення і зборки – від числа елементів, які входять до них. Прийmemo в якості основних геометричних критеріїв оптимальності при компонуванні АТСМ спрощення її структури і мінімізацію її об'ємно-габаритних параметрів.

Оскільки задачі зниження металоємності й оптимізації концентрації операцій взаємозалежні і повинні вирішуватися спільно на етапах технологічного і конструкторського компонування АТСМ, нами в якості основного введений комплексний показник компактності – *питома концентрація операцій* (число

технологічних переходів, що приходяться на одиницю об'єму зони обробки)

$$K_{Onum} = K_{ТП} / V_{зо} \rightarrow \max.$$

Як додаткові критерії використовуються показник питомого об'єму зони обробки

$$V_{num} = V_{зо} / V_{СТ} \rightarrow \max$$

і собівартість обробки деталі

$$C_e = f(\tau) \rightarrow \min.$$

Систему обмежень складають продуктивність АТСМ

$$Q = 60 / \tau \cdot K_{ТИ} \geq [Q_3]$$

і собівартість її виготовлення  $C_{СТ} = K_{сл} \cdot \Sigma C_{e_i} \leq [C_{лим}]$ .

Для поставленої багатокритеріальної задачі вибору найбільш уживаними можуть бути наступні способи рішення:

- знаходження умовного екстремуму основного критерію, заснованого на нерівнозначності частних критеріїв і завданні припустимих рівнів для додаткових критеріїв

$$x^* = \arg \{ \max K_{Onum}(x) \mid V_{num} \geq [V_{num}] \mid C_e \leq [C_e] \}; \\ x \in X$$

- метод поступок, заснований на установленні величини, на яку припустимо зменшити значення найважливішого критерію, щоб за рахунок поступки спробувати збільшити значення наступного по важливості критерію

$$g_1 = \sup K_{Onum}(x),$$

$$g_2 = \sup V_{num}(x), K_{Onum} \geq g_1 - \Delta K_{Onum},$$

$$g_3 = \sup C_e(x), V_{num} \geq g_2 - \Delta V_{num}.$$

Сучасні ринкові умови потребують бізнес-планування виробничої діяльності та обґрунтування доцільності інвестицій у технологічне устаткування, особливо дороге. Для оцінки економічної ефективності АТСМ доцільно використовувати методику, ключовими параметрами якої є величина чистого прибутку, одержаного за операційний цикл

$$ЧП = (Ц - C_e) \cdot Q - ПЗ \rightarrow \max$$

і строк окупності капітальних вкладень

$$ТО = C_{лим} \cdot K_{СТ} / ЧП \rightarrow \min.$$

В основу класифікації компоновань АВ середнього розміру нами покладений спосіб транспортування заготовки (табл. 1).

Перші три варіанти компоновання одержали найбільше поширення в конструкціях верстатів, що випускаються Харківським ПО АВ. Багатопозиційні АВ із транспортуванням заготовки по замкнутій круговій траєкторії мають великі можливості по реалізації складних технологічних процесів обробки деталей із залученням будь-яких методів концентрації і диференціації операцій, дозволяючи забезпечити найменший час обробки. Однак замкнутість траєкторії ускладнює взаємне просторове ув'язування вузлів верстата при компонуванні.

Порівняння АВ із круговим і прямолінійним транспортуванням деталей демонструє перевагу перших за ціною і займаною площею при великому числі позицій обробки. Крім того, компоновання з круговим транспортуванням заготовки, маючи менший питомий об'єм зони обробки, володіють більшою питомою концентрацією операції (рис.6). Саме ці компоновання обрані нами, як об'єкт дослідження і моделювання.

## Компоновочні схеми АВ середнього розміру

Тип схеми	Схема рухів верстата	Спосіб транспортування
Центральна	однопозиційна (ЦО)	Без транспортування
Центральна	багато-позиційна (ЦМ)	Періодичний поворот. Центр обертання - у площі вертикальної проекції деталі. Вісь обертання – вертикальна.
Периферійна	багато-позиційна (ПМ)	R
	Періодичний поворот. По круговій траєкторії з радіусом обертання R. Вісь обертання – вертикальна.	
Центроколонна (Ц)		
г		R
	Періодичний поворот. По круговій траєкторії з радіусом обертання $R > г$ . Вісь обертання - вертикальна.	
Барабанна (Б)		R
	Періодичний поворот. По круговій траєкторії з радіусом обертання R. Вісь обертання - горизонтальна.	

**У розділі 3** приведені результати розробки математичних моделей компонування АТСМ із круговим транспортуванням заготовки.

Автоматизація просторового компонування більшості складно структурованих технічних об'єктів, до яких повною мірою можуть бути віднесені АВ середнього розміру, зустрічають істотні труднощі як у математичному описі складних об'ємних форм частин, що компонуються, і самого компонування в цілому, так і в пошуку методів раціонального розміщення цих частин у просторі. Побудова формальної моделі такої задачі вимагає декомпозиції і спрощень.

Простір, який займає АТСМ, описано нами об'ємом компонування. Поняття об'єму компонування дуже відносно. Під об'ємом компонування АТСМ розуміється об'єм складеної геометричної фігури, “що обтягає” усі частини, які компонуються. Під частиною АТСМ, що компонується, розуміється визначена частина конструкції (елемент несучої системи, силовий агрегат і т.і.), яка відображається елементарним чи складеним геометричним об'єктом (паралелепіпедом, циліндром і т.і.). За принципом декомпозиції об'єм компонування АТСМ можна розбити на кінцеве число об'ємів функціональних зон. Назвемо функціональною зоною частину простору, у межах якої розташовується стаціонарний чи функціонує рухливий елемент. Сума об'ємів зон

$$V = \sum_{k=1}^n V_k, k = \overline{1, n}$$

дасть об'єм АТСМ, що компонується (рис.7):

де  $n$  – число функціональних зон у компованні.

У цьому випадку під конструкторською компоновкою (КК) будемо розуміти розміщення в просторі непересічних частин, що компонуються, при наявності деяких обмежень і загальної функції мети. Дане визначення цілком відповідає класичному визначенню укладання.

Очевидно, що мінімізація об'єму компонування АТСМ, як один із шляхів зниження металоємкості, повинна здійснюватися мінімізацією об'ємів функціональних зон, забезпечуючи компактність конструкцій елементів, а також за рахунок пошуку кращого варіанту суміщення (укладання) частин, що компонуються, у системі верстата на основі критеріїв компактності. Надалі, на основі системного принципу декомпозиції, розроблялися моделі функціональних зон АВ з метою мінімізації їхніх об'ємів за критеріями компактності. Оскільки конструктивну базу АТСМ складають уніфіковані елементи, вузли та агрегати, задача мінімізації об'ємів функціональних зон

уніфікованих елементів, що компонується, зводиться до вибору мінімально можливого елемента з параметричного ряду.

Одним із ключових моментів автоматизації проектування компонувань АТСМ варто вважати задачу опису структури і параметрів деталі, що оброблюється. Статистичний аналіз показав, що при всьому різноманітті номенклатури деталей, що оброблюються в АТСМ, найпоширеніша схема базування заготовок – основна–центруюча–поворотна (ОЦП) (рис.8), а найбільш характерною обробкою є обробка груп внутрішніх циліндричних поверхонь.

Поставивши задачу скорочення часу проектування, ми в першу чергу повинні скоротити час введення вихідних даних про деталь. Оскільки повний опис геометрії деталі, що представлена проєкційним кресленням, необхідно тільки для її візуалізації засобами ЕОМ, а для рішення задачі синтезу компонування АТСМ цього не потрібно, визначимо необхідний і достатній обсяг інформації про геометрію деталі. Очевидно, варто однозначно описувати поверхні, що оброблюються. Для цих цілей проведена класифікація поверхонь, що оброблюються, із вказівкою їхніх параметрів. Надалі при описі деталі досить задати для кожної поверхні, що оброблюється, параметри формотворних ліній: діаметра чи ширини обробки для утворюючої виробляючої лінії; координати точок початку і кінця поверхні, що оброблюється, для направляючої виробляючої лінії. Для цього на основі аналізу робочого креслення об'єкта обробки (деталі) необхідно задати положення системи координат деталі. Доцільно початок системи координат деталі суміщувати з центром симетрії деталі, задаючи напрямок координатних вісей відповідно до напрямку координатних вісей проєкційного креслення.

Як ядром функціональної системи АТСМ є оброблювана деталь (заготовка), так і ядром моделі об'ємів функціональних зон варто вважати об'єм зони обробки. Оскільки обробка на АВ ведеться при нерухомій (за час одиничного циклу роботи інструментів) заготовки, у випадку багатопозиційної обробки з круговим транспортуванням об'єм зони обробки визначається габаритними розмірами деталі та установочно-затискного пристрою (УЗП). Очевидно, що мінімізація об'єму зони обробки повинна виконуватися в першу чергу за рахунок удосконалювання конструкції УЗП. Через різноманіття геометричних форм оброблюваних в АТСМ деталей УЗП дотепер залишається оригінальним (неуніфікованим) елементом. Нами за основу були узяті п'ять типових компоновочних схем, для яких проводилися роботи з уніфікації в ХПО АВ.

Статистичний аналіз застосовності елементів у компонованнях УЗП дозволив визначити так званий умовний базовий пристрій: виконання пристрою – на позиційному столі периферійно; кількість і характер заготовок, що встановлюються, – одномоісне, однопозиційне; схема базування – ОЦП; тип приводу – пневматичний; механізм повернення – пружинний; основний механізм вузла затиску – двохскосий клин; додатковий механізм вузла затиску – важіль чи призма-повзун. Для нього розроблена геометрична модель (рис.9), що дозволяє вести оптимальне проектування за критерієм компактності.

На рис.10 показана геометрична модель формування габаритного радіуса АТСМ із круговим транспортуванням заготовки.

Задача зниження металоємкості верстата з круговою траєкторією транспортування заготовки може вирішуватися шляхом зменшення габаритного радіуса

$$R_{\Sigma} = R + L \rightarrow \min.$$

Мінімізація кожного із складників представляє дві окремі взаємозалежні задачі, що розв'язуються в загальному контексті синтезу оптимальної компоновки:

- Мінімізація радіуса транспортування заготовки

$$R > \min.$$

Зменшення радіуса транспортування заготовки веде до зменшення об'єму зони обробки. Рішення задачі мінімізації радіуса транспортування безпосередньо зв'язано з можливостями компоновання УЗП в обмеженому об'ємі зони обробки;

- Мінімізація габаритної довжини оснащеного силового агрегату

$$L = l_{CA} + l_{VTO} + (l_{ВИ} + l_{РИ}) + l_{БП} \rightarrow \min,$$

де  $l_{CA}$  – габарит силового агрегату;  $l_{VTO}$  – габарит вузла технологічного оснащення;  $l_{ВИ}$ ,  $l_{РИ}$  – довжина допоміжного і різального інструментів;  $l_{БП}$  – довжина відводу інструмента, що гарантує безпечний поворот деталі на наступну позицію (рис.11). Оскільки більшість елементів, що формують розмір  $L$ , є уніфікованими, а параметри  $l_{VTO}$ ,  $l_{ВИ}$ ,  $l_{РИ}$  припускають варіювання при проектуванні, то вже на ранніх етапах проектування АТСМ виникає можливість одержувати оптимальні конструкторсько-технологічні рішення для забезпечення компактності компоновання.

Розглянуті моделі оптимального проектування елементів АТСМ, які компонуються, склали основу бази знань процесу композиційного проектування, що розроблюється. Для реалізації композиційного підходу, який пропонується, потрібна була розробка автоматизованих методів самоорганізації оптимальної структури АТСМ із елементів, що компонуються.

У розділі 4 приведені результати розробки алгоритмічної моделі спрямованого синтезу компоновання АТСМ.

Для спрямованого формування просторового компоновання АТСМ із круговим транспортуванням заготовки доцільно використовувати математичний апарат афінних перетворень. Модель функціональних зон доповнена геометричною моделлю АВ у виді сукупності систем координат: деталі, пристрою, інструменту, силового агрегату, що певним чином зорієнтовані в системі координат верстату (рис.12). Ця модель покладена в основу розглянутої далі методики автоматизованого синтезу компоновання АТСМ.

Процес формування компоновання верстату (взаємного просторового ув'язування вузлів і елементів) можна представити у виді послідовності етапів:

1. На основі аналізу робочого креслення об'єкту обробки задати положення системи координат деталі.
2. Задати положення оброблюваної поверхні в системі координат деталі. Положення будь-якої точки в системі координат деталі задається матрицями:

$$P_D^\alpha = \left[ \begin{array}{ccc|c} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right],$$

обертання

де  $\alpha_{sk}$  – проекція одиничного вектора  $i_s^T$  системи вісей  $O_T X_T Y_T Z_T$  точки на напрямок  $i_s^3$  системи осей  $O_D X_D Y_D Z_D$  деталі;

$$P_D^r = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & r \\ 1 & 1 & 1 & r \\ 1 & 1 & 1 & r \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right],$$

переносу

де  $r = (X_T, Y_T, Z_T)$  – вектор положення точки в системі координат деталі.

Підсумкова матриця точки в системі координат деталі має вид:

$$P_D = P_D^\alpha \cdot P_D^r = \left[ \begin{array}{ccc|c} & & & \\ & \alpha & & \alpha \cdot r \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

3. Вибравши схему базування деталі, задати положення системи координат деталі в системі координат пристрою.

Положення початку системи координат деталі  $O_d$  у системі координат пристрою  $O_\Pi$  задається матрицями:

$$O_D^\alpha = \left[ \begin{array}{ccc|c} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right],$$

обертання

де  $\alpha_{sk}$  – проекція одиничного вектора  $i_s^d$  системи осей  $O_d X_d Y_d Z_d$  деталі на напрямок  $i_s^\Pi$  системи вісей  $O_\Pi X_\Pi Y_\Pi Z_\Pi$  пристрою;

$$O_D^r = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & r \\ 1 & 1 & 1 & r \\ 1 & 1 & 1 & r \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right],$$

переносу

де  $r = (X_d, Y_d, Z_d)$  - вектор положення початку координат деталі  $O_d$  у системі координат пристрою.

Підсумкова матриця положення початку системи координат деталі в системі координат пристрою має вид:

$$O_D = O_D^\alpha \cdot O_D^r = \left[ \begin{array}{ccc|c} & & & \\ & \alpha & & \alpha \cdot r \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right].$$

Очевидно, що для одержання матриці  $P_{PPC}$ , яка задає положення точки в системі координат пристрою, необхідно перемножити матриці  $P_D$  і  $O_D$ :

$$P_{PPC} = P_D \cdot O_D.$$

4. Після розробки маршруту обробки деталі і формування ТК АТСМ, на основі обраної схеми транспортування заготовки задати положення системи координат установчо-затискного пристрою в системі координат верстату.

Положення початку системи координат пристрою  $O_{\Pi i}$  у системі координат верстату в будь-якій позиції визначається матрицями:

$$O_{\Pi i}^\alpha = \left[ \begin{array}{ccc|c} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right],$$

обертання

де  $i$  – номер позиції обробки;  $\alpha_{sk}$  – проекція одиничного вектора  $i_s^\Pi$  системи вісей  $O_\Pi X_\Pi Y_\Pi Z_\Pi$  пристрою на напрямок  $i_s^c$  системи вісей  $O_c X_c Y_c Z_c$  верстату;

$$O_{\Pi i}^r = \left[ \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & r \\ 1 & 1 & 1 & r \\ 1 & 1 & 1 & r \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right],$$

переносу

де  $r = (X_n, Y_n, Z_n)$  - вектор положення початку системи координат пристрою  $O_n$  у системі координат верстату.

Підсумкова матриця положення початку системи координат пристрою в системі координат верстату має вид:

$$O_{n_i} = O_{n_i}^\alpha \cdot O_{n_i}^r = \left[ \begin{array}{ccc|c} & & & \\ & \alpha & & \alpha \cdot r \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

5. Для всіх поверхонь деталі, що оброблюються, визначити їхнє положення в системі координат верстату.

При визначенні положення точки на площині в будь-якій позиції обробки, використовуючи

$$\frac{(Y_{O_n}^I + X_{O_n}^0 \cdot \sin \alpha)}{Y_{O_n}^0} = \cos \alpha$$

розрахункову схему, із трикутника  $ABO_c$  маємо

де  $\alpha$  - кут повороту на одну позицію. Відкіля

$$Y_{O_n}^n = Y_{O_n}^0 \cdot \cos \alpha - X_{O_n}^0 \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

де  $n$  – число позицій обробки.

З трикутника  $ACO_c$  маємо

$$\frac{(X_{O_n}^I - X_{O_n}^0 \cdot \cos \alpha)}{Y_{O_n}^0} = \sin \alpha$$

$$X_{O_n}^n = Y_{O_n}^0 \cdot \sin \alpha + X_{O_n}^0 \cdot \cos \alpha$$

Відкіля

(2)

Значення  $X$  і  $Y$  у (1, 2) необхідно брати з урахуванням знака відповідної чверті.

Очевидно, що для одержання матриці  $P_{CT}$ , що задає положення точки в системі координат верстату в кожній позиції, необхідно перемножити матриці  $P_{PPC}$  і  $O_{Pi}$  (у відповідній позиції):

$$P_{CT_i} = P_{PPC} \cdot O_{Pi}$$

де  $i$  - номер позиції обробки.

6. Координати точок початку і кінця різання поверхонь, що оброблюються, визначають просторове положення інструментальних вісей силових агрегатів у кожній позиції обробки.

Для одержання положення початку системи координат інструмента  $O_{ИНС}$  (у будь-якій позиції обробки) у системі координат верстату, необхідно у відповідній матриці  $P_{CT_i}$ , що задає положення точки (яка є точкою кінця робочого ходу інструменту) у системі верстату, виконати такі перетворення: поміняти місцями перший і другий рядки матриці; третій рядок матриці помножити на  $-1$ . Це справедливо для будь-якого варіанту розташування силового агрегату.

З метою автоматизації етапу проектування конструкторського компонування багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки розроблено алгоритм і програма, що реалізує даний підхід до формування компонування на основі апарату афінних

перетворень. Результати роботи програми (координати розташування частин верстату, що компонуються, в єдиній системі координат верстату) дозволяють формувати креслення загального виду АТСМ. Скорочення часу для виконання даного етапу дозволяє вести варіантне проектування.

Можливість зменшення радіусу розташування силового агрегату і радіусу транспортування деталі може обмежуватися габаритними розмірами вузлів і елементів, які компонуються в межах сектору позиції обробки. При проектуванні технологічного і конструкторського компонування агрегатних верстатів досить типовою є задача раціонального розподілу безлічі різальних інструментів по позиціях обробки і, відповідно, об'єднання їх у багатошпindelні насадки або коробки, ширина яких найчастіше визначає габарит оснащеного силового агрегату. Подібна задача завжди вирішується при необхідності свердління груп отворів з паралельними вісями. Проблему в цьому випадку визначають обмеження на число інструментів у насадці або коробці, що обумовлені осьовим зусиллям різання, що допускається, а також крутильним моментом. Крім того, задача розподілу безлічі отворів в одній насадці або коробці пов'язана з конструктивним обмеженням величини міжцентрової відстані між шпинделями, обумовленої діаметрами підшипників опор шпинделів. Особливий інтерес тут може представляти граничний випадок – обробка безлічі отворів, що утворюють щільне укладання у вигляді решітки рівносторонніх трикутників (рис.13). Задача розміщення сформульована таким чином: розподілити обробку системи отворів  $\{G_i\}$ ,  $i=1, I$ , що утворюють щільне укладання в межах замкнутої фігури (у нашому випадку кола з радіусом  $R$ ), на мінімальному числі позицій обробки за умови, що кожна багатошпindelна насадка або коробка не повинна мати більше  $[K]$  шпинделів, а відстань між осями шпинделів у насадці або коробці не можуть бути менше  $[L]$ :

$$\{g_k\} \subset \{G_i\}, i=1, I; ?\{g_k\} = I; N > \min; \\ k ? [K]; ?l ? [L].$$

На основі рішення даної задачі розроблені алгоритм і програма раціонального розміщення багатошпindelної обробки множин отворів з паралельними вісями в багатопозиційних АТСМ.

У розділі 5 розглядається загальна методика автоматизованого композиційного проектування АТСМ.

На основі алгоритмічної моделі синтезу просторового компонування і розробки правил прийняття технічних рішень на різних стадіях проектування за критеріями компактності та економічності реалізований ітераційний метод проектування компонувань багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки. Для автоматизації процесу проектування розроблена методика спрямованого синтезу компонування УЗП (рис.14). Ядром методики є база знань, сформована з таблиць відповідностей, складених, у свою чергу, на основі аналізу і класифікації конструкцій УЗП. Проведена декомпозиція “від загального до частки” і відображена у виді таблиць вибору дозволяє здійснити зворотний процес композиції “від вибору елементів системи до синтезу системи в цілому”. Методика припускає інтерактивне проектування. Конструктор бере участь у заданні вихідних даних і прийнятті рішення при наявності альтернатив на кожному кроці проектування.

При переході до автоматизованого проектування компонувань необхідно не тільки формалізувати фактуальні (що проектувати?) і процедурні (як проектувати?) знання, але і варто виробити інформаційну модель складу елементів складної системи.

Для формального опису такої структурної моделі може бути використана структурна



формула або інформаційний код. Слід зазначити, що існуючі способи позначення (кодування) агрегатованого устаткування не несуть необхідної інформації про його структуру. Зважаючи на те, що АТСМ, як складна система, має ієрархічну структуру:

$$\begin{array}{c} / \quad / \quad / \quad / \\ \backslash \quad \backslash \quad \backslash \quad \backslash \\ \text{АТСМ} - \text{ПО} - \text{СА} - \text{РІ} - \text{ТП} < \text{технологічний процес} > \text{ЕП} - \text{ГП} - \text{СО} - \text{Д} \\ / \quad / \quad / \quad / \\ \text{АТСМ} = \{ \text{ПО}_g \}, g=1, G; \text{ПО}_g = \{ \text{СА}_i \}, i=1, I_g; \text{СА}_i = \{ \text{РІ}_j \}, j=1, J_i; \text{РІ}_j = \{ \text{ТП}_k \}, k=1, K_j; \\ \text{Д} = \{ \text{СО}_n \}, n=1, N; \text{СО}_n = \{ \text{ГП}_m \}, m=1, M_n; \text{ГП}_m = \{ \text{ЕП}_l \}, l=1, L_m, \end{array}$$

де ПО – позиція обробки, СА – силовий агрегат, РІ – різальний інструмент, ТП – технологічний перехід, Д – деталь, СО – сторона обробки, ГП – група поверхонь, ЕП – елементарна поверхня, інформаційний код компонування АТСМ повинний задовольняти наступним вимогам:

- 1) однозначно і повно описувати синтезоване компонування верстату відповідно до графа його структури;
- 2) мати блокову структуру і різні рівні деталізації на кожному етапі проектування верстату;
- 3) при різній ступені конкретизації параметрів на кожному етапі проектування дозволяти по можливості без залучення додаткової інформації проводити оцінку проектних рішень.

У загальному виді конструктивний код АТСМ може бути записаний у наступному виді:

$$\begin{array}{l} \mathbf{N: [АТСМ]: 3: Л: О: К: V - 1: [ПО]: C: КО_{\text{ПИТ}} - 1: [СА]: Т: Р: П: У: Ч - 1: [РІ]: И: X: Н} \\ \mathbf{\backslash G: [ПО]: C: КО_{\text{ПИТ}} - .: [СА]: Т: Р: П: У: Ч - .: [РІ]: И: X: Н} \\ \mathbf{\backslash I: [СА]: Т: Р: П: У: Ч - .: [РІ]: И: X: Н} \\ \mathbf{\backslash J: [РІ]: И: X: Н} \end{array}$$

де N - обліковий номер верстату; 3 - вид переміщення заготовки (по круговій траєкторії, по прямій); Л - положення площини переміщення заготовки (горизонтальна, вертикальна); О - тип пристрою (стаціонарне, супутник); К - конструктивний код пристрою; V – об'єм зони обробки; 1...G - порядковий номер позиції обробки; 3 - тип позиції обробки (циклова, внециклова); КО<sub>ПИТ</sub> – питома концентрація обробки на позиції; 1...I - порядковий номер силового агрегату на позиції; Т - тип силового агрегату (голівка, стіл); Р - розташування силового агрегату (положення системи координат агрегату в системі координат верстату); П - принцип компонування агрегату (моноблочний, блоковий); У - тип вузла оснащення (насадка, бабка, коробка); Ч - число шпинделів; 1...J - порядковий номер інструменту в агрегаті; И - тип інструменту (стандартний, спеціальний); X – розташування інструменту (положення інструментальної вісі в системі координат верстату); Н - ознака направлення інструменту (кондуктор).

Сформований при проектуванні інформаційний код верстату є протоколом прийнятих компоновочних рішень. Маючи різний ступінь деталізації для кожної стадії проектування, він дозволяє при необхідності робити відкіт на попередні етапи з архівуванням змінюваних даних, що дає можливість надалі порівнювати результати ітерацій.

У розділі 6 виконана експериментальна перевірка отриманих результатів досліджень. З використанням розроблених математичних моделей і методик проведена апробація композиційного проектування на реальних задачах проектування компоновок багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки. Так, композиційне проектування дозволяє розвинути одну з первісних ідей принципу

агрегативання, що полягає в багаторазовій функціональній і технологічній оборотності (перекомпонуванні) устаткування при зміні об'єкту виробництва. У рамках науково-технічного співробітництва з ХПО АВ і розробки теми “Удосконалювання структури і якості створення агрегатних верстатів” впроваджені в практику проектування Спеціального конструкторського бюро агрегатних верстатів ряд методик, серед яких методика вибору оптимального компоновання при конструюванні багатопозиційних АВ; методика розрахунку розмірного взаємозв'язку позицій АВ, що залежать від варіанту компоновки; методика проектування компоновки центроколоного багатопозиційного АВ середнього розміру; методика автоматизованого проектування технологічного оснащення АВ. Використання запропонованих методик дозволяє скоротити трудомісткість проектування і виготовлення АВ у середньому на 20%. Загальний економічний ефект, досягнутий за рахунок зниження собівартості створюваних верстатів і збільшення прибутку ХЗАВ склав 10 000 – 15 000 грн. на один агрегатний верстат у залежності від структурної складності.

У рамках творчого співробітництва кафедри технології машинобудування і металорізальних верстатів НТУ“ХП” із ДП ХМЗ“ФЕД” деякі результати досліджень в області компонетики АТСМ були використані при переналагодженні АВ на ділянці товарів народного споживання (деталей сантехарматури). Зміна дизайну і, відповідно, конструктивного виконання основної деталі – корпуса змішувача вимагали переналагодження-перекомпонування спеціальних АВ, що експлуатуються на заводі. Методика композиційного проектування, що запропонована, для груп однотипних деталей дозволяє скоротити час і трудомісткість технологічної підготовки виробництва при зміні об'єкту виробництва на 10-15%.

Проведені дослідження і розробка основних методологічних положень компонетики АТСМ дозволяють зробити висновок про те, що агрегативання залишається одним з ефективних і надійних принципів створення високопродуктивного технологічного устаткування, і не тільки спеціального. Забезпечення гнучкості багатопозиційних АТСМ принципово можливо. Для цього потрібна розробка й освоєння переналагоджуваних агрегатних верстатів. Для можливості переналагодження технологічне устаткування повинне мати функціональну надмірність, що для багатопозиційних багатоінструментних АТСМ виражається в необхідності забезпечення на етапі їхнього створення структурної надмірності. Так, АТСМ із круговим транспортуванням заготовки, володіючи можливістю здійснення на них технологічних процесів, що включають велику кількість технологічних переходів, саме таку структурну надмірність і мають. Задача компоновання цього високопродуктивного устаткування ускладнюється необхідністю розміщення (укладання) у просторі робочої зони можливо більшої кількості інструментальних шпинделів, а в компонованому просторі верстата відповідно вузлів і агрегатів, що забезпечують роботу цих шпинделів. Для можливості переналагодження на обробку деталей із групами співвісних поверхонь запропонована концептуальна компоновочна схема АВ із круговим транспортуванням заготовки, якій має центральну колону, що укомплектований одношпindelними силовими агрегатами (рис.15). На одинадцятьох операційних станціях розміщені двадцять сім позицій обробки, кожна з яких обслуговується одним силовим агрегатом. Таке компоновання на відміну від традиційного периферійного компоновання дозволяє здійснювати послідовну обробку на 5, 11, 16, 22 або 27 позиціях обробки. Для запропонованого компоновання АВ збільшеним методом проведена порівняльна оцінка економічної ефективності його використання при обробці однотипних

корпусних деталей гідроарматури.

У додатку представлені таблиці допоміжного характеру, що є частиною інформаційного забезпечення методик проектування, деякі результати практичного використання проектних процедур, а також акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено методологічні основи композиційного проектування багатопозиційних АТСМ за критеріями компактності й економічності, що дозволяє підвищити техніко-економічні показники, розширити технологічні можливості, зменшити габарити і металоємкість при оптимізації технологічного впливу в процесі обробки і просторово-структурних характеристик устаткування.
2. На основі системного аналізу процесу проектування багатопозиційних АВ встановлено, що існуючий декомпозиційний підхід до проектування, для якого характерний емпіричний чи евристичний вибір структури АВ на ранніх етапах проектування і децентралізована розробка елементів, що компонуються, через складність забезпечення координуючих впливів на локальні проектні рішення, не дозволяє надійно забезпечити оптимальне рішення на рівні системи в цілому. Потрібен перехід на іншу технологію проектування – спрямоване формування оптимальної структури АВ із заданими властивостями елементів, що можуть змінювати свої параметри і конструктивне виконання в інтересах оптимізації системи, що розробляється. Такий підхід зветься композиційним проектуванням і покладений в основу розроблених методик проектування АТСМ.
3. Відмінною рисою обробки на багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки є висока концентрація операцій при малому питомому об'ємі зони обробки, що дозволяє для спільного рішення задач зниження металоємкості конструкції та оптимізації концентрації операцій ввести комплексний показник компактності – питома концентрація операції.
4. Представлення простору, що займає АВ, об'ємом компонування, за принципом декомпозиції розбитого на кінцеве число об'ємів функціональних зон з їх описом математичними моделями, дозволило вирішувати задачу синтезу просторового компонування АТСМ, як задачу компактного укладання елементів, що компонуються.
5. Пошук кращого варіанту суміщення (укладання) частин, що компонуються, у свою чергу, виконується при мінімізації об'ємів функціональних зон за рахунок структурно-параметричної оптимізації оснащених силових агрегатів і установчо-затискних пристроїв.
6. Для спрямованого формування просторового компонування багатопозиційних АТСМ із круговим транспортуванням заготовки доцільне використання математичного апарату афінних перетворень. Для цього модель функціональних зон доповнена геометричною моделлю компонування АТСМ у виді сукупності систем координат (деталі, пристрою, інструменту, силового агрегату), що покладена в основу методики автоматизованого синтезу компонування.
7. Рішення задачі мінімізації радіусу транспортування заготовки, як підзадачи мінімізації габаритного радіусу АТСМ із круговим транспортуванням заготовки, вимагає зменшення об'єму зони обробки, що можливо тільки за рахунок удосконалювання конструкції установчо-затискного пристрою. Для моделі типового компонування УЗП розроблена методика структурно-параметричної

- оптимізації, що дозволяє підвищувати компактність конструкції.
8. Забезпечення гнучкості технологічного устаткування, створюваного за методом концентрації операцій на основі принципу агрегування, можливо як за рахунок їхнього перекомпонування, так і за рахунок переналагодження. Для можливості переналагодження устаткування повинне мати функціональну надмірність, що для багатопозиційних багатоінструментних АТСМ виражається в необхідності забезпечення на етапі їхнього створення обґрунтованої структурної надмірності. Для можливості переналагодження при обробці деталей із групами співвісних поверхонь запропонована концептуальна компоновочна схема АВ надлишкової структури із круговим транспортуванням заготовки, якій має центральну колону.
  9. Застосований у методиці синтезу компоновань АТСМ спосіб опису деталі і компоновання у виді інформаційного коду, що виконує при проектуванні роль протоколу, дозволяє для технологічного устаткування, що не має повних аналогів, вести облікову базу-архів компоновочних рішень для великої номенклатури деталей. Побудована на її основі інформаційно-пошукова система може бути корисна як виробникам такого устаткування, так і потенційним споживачам.
  10. Практична реалізація основних результатів дослідження дозволяє підвищити продуктивність і якість проектних процедур синтезу компоновань багатопозиційних АТСМ, а також підвищити техніко-економічну ефективність і розширити технологічні можливості даного класу устаткування. Розроблене інформаційне й алгоритмічне забезпечення може бути покладене в основу підсистеми САПР агрегатних верстатів.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тимофеев Ю.В., Пермяков А.А., Приходько О.Ю. Систематизация компоновок агрегатных станков. // "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". Сборник научных трудов ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. – 1998. – Вып. 6. - С.215-218.
2. Пермяков А.А., Алехин В.А., Приходько О.Ю. Об оптимальной концентрации операций при ограниченном объеме зоны обработки в агрегатированных технологических системах. // Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. – 1998. - Вып.27. - С.120-124.
3. Пермяков А.А. Информационное описание компоновок агрегатных станков при проектировании. // Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. – 1999. - Вып.32. - С.146-150.
4. Пермяков А.А., Алехин В.А., Слипченко С.Е. О структуре формирования габаритного радиуса агрегатных станков с целью его минимизации. // Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 1999. – Вып.43. - С.10-13.
5. Мельниченко А.А., Пермяков А.А. Математическая модель геометрической точности агрегатного станка. // Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 1999. - Вып.54. - С.34-39.
6. Тимофеев Ю.В., Пермяков А.А., Алехин В.А., Тань Яо Хуэй Особенности компоновки рабочих органов агрегатных станков в системах с кольцевым транспортированием заготовки. // Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 1999. - Вып.59. - С.71-72.
7. Тимофеев Ю.В., Мельниченко А.А., Пермяков А.А. Промышленный эксперимент и методика экспресс-анализа параметров в агрегатном станкостроении. // Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 1999. - Вып.60. - С.3-7.
8. Пермяков А.А., Приходько О.Ю. Цикловая производительность агрегатных станков при различных вариантах совмещения технологических переходов. // Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 1999. - Вып.65. - С.97-99.
9. Тимофеев Ю.В., Пермяков А.А. Управление эффективностью многоинструментальных

- наладок агрегатных станков на ранних стадиях проектирования. //Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков:ХГПУ. - 1999. - Вып.53. - С.159-166.
10. Мельниченко А.А., Пермяков А.А. Математическая модель статической жесткости шпинделя силовой головки агрегатного станка. //Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков:ХГПУ. - 1999. - Вып.54. - С.17-21.
  11. Науменко В.П., Пермяков А.А., Сычев Ю.И., Кондратюк О.Л., Корж О.В. Математическое моделирование статических и динамических характеристик шпиндельных узлов металлорежущих станков. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 1999. - Вып.75. - С.44-48.
  12. Пермяков А.А. Формирование пространственной компоновки многопозиционного агрегатного станка на основе аффинных преобразований. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.77. - С.97-99.
  13. Науменко В.П., Пермяков А.А. Моделирование динамической жёсткости вала-шпинделя силовой головки агрегатного станка на основе МКЭ. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.78. - С.37-40.
  14. Хицан В.Д., Пермяков А.А. Критерии оценки технико-экономического уровня компоновок специальных агрегатных станков. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.80. - С.44-46.
  15. Пермяков А.А., Яковенко И.Э., Фадеев А.В. Анализ применимости конструкций установочно-зажимных приспособлений агрегатных станков среднего размера. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.81. - С.37-39.
  16. Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Приходько О.Ю. О композиционном проектировании агрегатированных технологических систем. //Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им.Н.Е.Жуковского "ХАИ". - Харьков:ХАИ. - 2000. - Вып.14. - С.51-53.
  17. Пермяков А.А., Гаврылюк Ю.Р. О подходе к компоновке агрегатного станка для реализации групповой обработки. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.82. - С.50-52.
  18. Громов В.В., Пермяков А.А., Скидан Н.П., Хицан В.Д. Аналіз залежності параметрів технологічної компоновки від базових параметрів верстата. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.83. - С.28-31.
  19. Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Яковенко И.Э. Оптимизация проектирования и производства УЗП на основе унификации компоновочных решений. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.110. - С.70-74
  20. Пермяков А.А. Выбор вариантов компоновки агрегатного станка на основе комплексного показателя компактности. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 2000. - Вып.118. - С.28-30.
  21. Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Яковенко И.Э. Организация поточной сборки агрегатированного оборудования. //Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". - Харьков:НТУ "ХПИ". - 2001. - Вып.10. - С.137-140.
  22. Пермяков А.А. Концептуальные компоновки переналаживаемых агрегатных станков избыточной структуры //Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт. - Харьков:НТУ "ХПИ". - 2002. - Вып.6. - С.62-65.
  23. Тимофеев Ю.В., Пермяков А.А., Приходько О.Ю., Яковенко И.Э. Принципы оптимизации компоновок агрегатных станков. //Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 1997. - С.351-354.
  24. Тимофеев Ю.В., Пермяков А.А., Приходько О.Ю. Информационная модель объекта

- обработки в САПР агрегатных станков. //Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. - 1998. – Вып.6. - С.219-223.
25. Пермяков А.А. Геометрические критерии оптимальности компоновок агрегатных станков с кольцевым транспортированием. //Вестник ХГПУ - Харьков:ХГПУ. - 1999. - Вып.32. - С.151-153.
26. Пермяков А.А., Алехин В.А. Алгоритм размещения многошпиндельной обработки в многопозиционных агрегатированных системах при обработке отверстий, образующих плотную укладку. //Вестник ХГПУ. - Харьков:ХГПУ. -1999. - Вып.54. - С.18-21.
27. Пермяков А.А., Приходько О.Ю., Фадеев А.В. О структуре процесса проектирования и компоновке агрегатированных технологических систем металлообработки. //Вісник інженерної академії України. - К.:ІАУ. – 2000. - (специальный выпуск). - С.136-139.
28. Громов В.В., Пермяков О.А., Скидан Н.П. Класифікація технологічних компоновок металорізальних верстатів. //Вісник інженерної академії України. – К.:ІАУ. - 2001. - №3 (частина 1). - С.256-258.

### АНОТАЦІЇ

Пермяков О.А. Теоретичні основи компонентики агрегованих технологічних систем. Дисертація у вигляді рукопису на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2002 р.

В роботі вперше розроблена методологія композиційного проектування багатопозиційних агрегованих технологічних систем із круговим транспортуванням заготовки, що дозволяє підвищити техніко-економічні показники, зменшити габарити і металоємність за рахунок оптимізації просторово-структурних характеристик технологічного устаткування, що створюється за принципом агрегування, на основі нового комплексного критерію – питомої концентрації обробки. На основі розробки узагальненої моделі, принципів спрямованого синтезу просторового компонування АТСМ на базі апарату афінних перетворень координатних систем елементів, що компонуються, оптимізації компоновочних рішень за критеріями компактності й економічності на різних стадіях деталізації проекту розроблені методика і комплекс інформаційного та алгоритмічного забезпечення автоматизованого проектування виділеного класу технологічних систем.

Ключові слова: технологічна система, технологічна компоновка, питома концентрація операції, установочно-затискний пристрій, агрегування, компактність та економічність, багатокритеріальна оптимізація, композиційне проектування, афінні перетворення.

Пермяков А.А. Теоретические основы компонентики агрегатированных технологических систем. Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2002 г.

В работе впервые разработана методология композиционного проектирования многопозиционных агрегатированных технологических систем с круговым транспортированием заготовки, позволяющая повысить технико-экономические показатели, уменьшить габариты и металлоемкость за счет оптимизации пространственно-структурных характеристик технологического оборудования,

создаваемого по принципу агрегатирования, на основе нового критерия – удельной концентрации операции. Отличительной особенностью технологических систем, рассматриваемых в данной работе, является высокая концентрация операций при малом удельном объеме зоны обработки. Удельная концентрация операции, определяемая числом технологических переходов приходящихся на единицу объема зоны обработки, по сути является комплексным показателем компактности сложноструктурных АТСМ и используется при их проектировании для оценки конкурирующих вариантов совмещения технологических переходов во времени и пространстве (технологических и конструкторских компоновок).

В основу разработанных методик синтеза оптимальных компоновок АТСМ в отличие от традиционного декомпозиционного подхода, для которого характерен эмпирический или эвристический выбор структуры системы на ранних этапах проектирования, положена технология композиционного проектирования - направленное формирование оптимальной структуры системы с заданными свойствами компонуемых элементов, которые могут менять свои параметры и конструктивное исполнение в интересах оптимизации разрабатываемой технологической системы. Для реализации композиционного проектирования разработана база знаний, содержащая обобщенную модель компоновки многопозиционной агрегатированной технологической системы с круговым транспортированием заготовки и модели компонуемых элементов. Пространственно-структурно-параметрическая оптимизация и выбор компоновочных решений на любом этапе проектирования (синтез инструментальной наладки, установочно-зажимного приспособления и т.д.) выполняются по критериям компактности и экономичности.

Для направленного формирования пространственной компоновки АТСМ с круговым транспортированием заготовки используется математический аппарат аффинных преобразований. Модель АТСМ в виде совокупности систем координат детали, приспособления, инструмента, силового агрегата положена в основу методики автоматизированного синтеза компоновок АТСМ. С целью сокращения времени проектирования и, в первую очередь, сокращения времени ввода исходных данных о детали установлено, что полное описание геометрии детали, представленной проекционным чертежом, не требуется. Следует однозначно описывать только обрабатываемые поверхности детали. Причем, достаточно задать для каждой обрабатываемой поверхности параметры формообразующих линий: диаметра или ширины обработки для образующей производящей линии; координаты точек начала и конца обрабатываемой поверхности для направляющей производящей линии. Процесс формирования компоновки АТСМ (взаимной пространственной увязки узлов и элементов реализующих процесс обработки детали) состоит из последовательности следующих этапов: на основе анализа рабочего чертежа объекта обработки определяется положение системы координат детали; задается положение обрабатываемых поверхностей в системе координат детали; на основе выбора схемы базирования детали, задается положение системы координат детали в системе координат приспособления; после разработки маршрута обработки детали и формирования технологической компоновки АТСМ, на основе выбранной схемы транспортирования детали задается положение системы координат установочно-зажимного приспособления в системе координат АТСМ; для всех обрабатываемых поверхностей детали определяются все их положения в системе координат АТСМ на основе аффинных преобразований координатных систем. Координаты точек начала и конца резания обрабатываемых поверхностей определяют пространственное положение инструментальных осей оснащенных силовых агрегатов в

каждой позиции обработки. Получаемые координаты расположения компонуемых частей АТСМ в единой системе координат позволяют окончательно формировать компоновку АТСМ.

Наилучший вариант компоновки многопозиционной АТСМ с круговым транспортированием заготовки определяется на основе многокритериальной оптимизации. В качестве основного критерия принята удельная концентрация операции. Дополнительными критериями являются удельный объем зоны обработки (отношение объема зоны обработки и объема компоновки) и технологическая себестоимость обработки детали в АТСМ. Систему ограничений составляют производительность АТСМ и себестоимость ее изготовления.

На основе разработки обобщенной модели, принципов направленного синтеза пространственной компоновки АТСМ на базе аппарата аффинных преобразований координатных систем компонуемых элементов, оптимизации компоновочных решений по критериям компактности и экономичности на разных стадиях детализации проекта разработан комплекс информационного и алгоритмического обеспечения, который может быть положен в основу системы автоматизированного проектирования рассматриваемого класса технологических систем.

Ключевые слова: технологическая система, технологическая компоновка, удельная концентрация операции, установочно-зажимное приспособление, агрегатирование, компактность и экономичность, многокритериальная оптимизация, композиционное проектирование, аффинные преобразования.

Permyakov A.A. Theoretical bases of arrangement the unit-building technological systems. The dissertation as the manuscripts on competition of a scientific degree of the doctor of engineering science on a speciality 05.02.08 – technology of machine building. National engineering university "The Kharkov polytechnic institute", Kharkov, 2002.

The methodology of composition projection of multi-position unit-building technological systems with circle transportation of detail permitting to increase technological indexes, to decrease dimensions and metal consumption at the expense of optimization of space-structural performances of the process equipment created by a unite-building principle, on the basis of a new complex criterion - specific concentration of the operation in work for the first time is developed. On the basis of development of the generalized model, principles of the directed synthesis of space arrangement of unit-building technological systems on the basis of method transformations of coordinate systems of composed elements, optimization of arrangement solutions by criteria of compactness and profitability at different stages of detailing of the project the principles and complex of information and algorithmic support of a computer-assisted design of the chosen class of technological systems is developed.

Key words: the technological system, technological arrangement, specific concentration of the operation, adjusting-clamping device, unite-building principle, compactness and profitability, multi-criteria optimization, composite projection, method transformations of coordinate systems.



Захист відбудеться 13 червня 2002 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою:  
61002, м.Харків, вул.Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий 11 травня 2002 року.