

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ

на правах рукопису

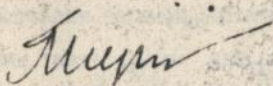
МІРОШНИЧЕНКО ГАЛИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

СТАТИСТИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМПРЕСОРА ГТД
НА ОСНОВІ ГРУПОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ЕТАЛОНІВ
ДРОСЕЛЬНИХ ТА РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

05.13.02 - математичне моделювання в наукових
дослідженнях

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



ХАРКІВ - 1995



00777185 (Z)

Робота виконана на кафедрі прикладної та обчислювальної математики та на кафедрі економічної кібернетики Харківського авіаційного інституту.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Кожухов Валерій Дмитрович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сімбірський Дмитро Федорович
доктор фізико-математичних наук, доцент
Бабенко Володимир Іванович

Провідна організація - Миколаївське НВП "Машпроект"
(міністерство машинобудування,
військово-промислового комплексу та
конверсії, м. Миколаїв)

Захист відбудеться "20" "09" 1995 р. о 14 годині на
засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 02.18.02 в Інституті
проблем машинобудування НАН України за адресою: 310046, м.
Харків, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту
проблем машинобудування НАН України за адресою: 310046,
м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
авторський відбиток 04.07 1995 р.

Вчений секретар Спеціалізованої
вченої ради к. ф. м. н., с. н. с. Веретельник В. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

Актуальність теми. Створення і розвиток систем автоматизованого проектування (САПР), які дозволяють суттєво скоротити строки розробки приладу, збільшити якість і точність проектування, знизити собівартість розробки, неможливі без створення адекватних математичних моделей (ММ) вузлів виробу разом з алгоритмами їх застосування і включення до САПР, а також розробки програмних засобів для використання ММ і розрахунків за їх допомогою. Сучасні тенденції розвитку прикладних програмних комплексів пов'язані з розробкою спеціалізованих пакетів, які орієнтовані на розв'язання конкретного кола задач з обрані предметної галузі. Використовувачем таких пакетів є фахівець в цій галузі, а не в галузі ЕОМ, тому все ширше приділяється увага підвищенню рівня інтерактивності програмного забезпечення.

Об'єктом моделювання в цій роботі є компресор як агрегат газотурбинного двигуна (ГТД). В результаті моделювання має бути отримана його статистико-аналітична ММ у вигляді робочих характеристик (РХ). Згідно з загальноприйнятим визначенням, під ММ розуміється сукупність рівнянь, умов, обмежень та алгоритмів їх застосування, що описують функціонування об'єкту. Відомо, що деякі фізико-хімічні процеси в ГТД поки не піддаються аналітичному опису, без використання експериментальних залежностей та апроксимацій. Вхідним матеріалом для моделі є результати натурних випробувань компресора, зняті за його дросельними характеристиками (ДХ), або, в деяких випадках, натурні випробування можуть безпосередньо проводитися в площині РХ.

Розробка статистико-аналітичної ММ двигуна є складовою

задач. Великих зусиль було докладено для розв'язання проблеми математичного представлення компресора ГТД, тому що функціонування цього вузла двигуна є найбільш складним з точки зору математичного моделювання. Значних успіхів на цьому шляху отримали такі вчені: С. М. Шляхтенко, В. А. Сосунов, А. П. Тунаков, В. І. Вакулев, Л. М. Дружинін, Б. М. Бориєнко, Д. К. Чернишов і багато інших, але не всі труднощі подолані. Тому класу поверток, які описують характеристики компресора, притаманні специфічні особливості, які неможливо забезпечити за допомогою класичних методів апроксимації. Більш того, досить складною є задача формального опису у вигляді, зручному для моделювання, саме тих особливостей, які можуть бути сформульовані для характеристик компресора на базі особистого досвіду фахівця в галузі компресоробудування. Тому є актуальним створення спеціальних математичних засобів розв'язання задачі статистико-аналітичного моделювання (САМ) компресора ГТД.

Робота виконувалась з 1991 по 1993 р. на кафедрі прикладної та обчислювальної математики Харківського авіаційного інституту (ХАІ) у відповідності до д/б теми Г-303-94/92 "Розробка системних математичних моделей складних технічних систем" (Н ДР N 0193И002992) і з 1993 по 1994 р. на кафедрі економічної кібернетики ХАІ.

Мета роботи - теоретична розробка універсальної методики побудови ММ компресора ГТД у вигляді його РХ на базі статистичного матеріалу, отриманого при натурних випробуваннях, з залученням до результативної моделі розроблених алгоритмів, що забезпечують виконання фізично обумовлених вимог для кожної з сімей модельованих характеристик, а також практична реалізація створеної ММ у вигляді пакету приклад-

них програм, орієнтованого на використання фахівцем-компресоробудувачем для розв'язання широкого кола задач по обробці даних, отриманих при випробуваннях компресорів.

Основними завданнями дисертаційної роботи є:

- уніфікація способів завдання вхідних даних;
- формалізація досвіду фахівців з обраної предметної галузі (компресоробудування) з метов формування ознак класів ліній, що задають ДХ та РХ;
- розробка моделей полів ДХ, що задовольняють фізично обумовленим ознакам введених класів ліній;
- розробка методики пошуку помилкових замірів і впорядкування ДХ з використанням у статистичних критеріях фізично обумовленої інформації;
- розробка моделі РХ, що задовольняє ознакам класів РХ;
- розробка працездатного алгоритму опуклого згладжування, що не заснований на інтерпольванні;
- оцінювання точності, економічності та швидкодії моделей;
- практична реалізація створених методик у вигляді комплексу прикладних програм (КПП), орієнтованого на використання фахівцем в галузі компресоробудування.

Методика дослідження ґрунтується на базі теорій сплайн-апроксимації, розпізнання зображень і теорії груп.

Теоретична цінність і наукова новизна роботи полягають у теоретичній розробці нової методики обробки статистичного матеріалу і побудові ММ компресора у вигляді аналітичних апроксимацій. Створена методика САМ компресора враховує задані глобальні ознаки вхідних даних. Це досягнуто теоретичною розробкою нових методів чисельної формалізації модельованих ознак, основною з яких є ознака опуклості.

Отримано такі нові наукові результати:

- знайдено мінімальний набір загальних функціональних залежностей і аналітичних виразів, за допомогою якого сформульовано і вперше адекватно та економно розв'язано задачу САМ компресора в цілком автоматизованому режимі;
- запропоновано новий опис класів характеристик компресора, заснований на введенні поняття еталона класу характеристик - узагальненого образ. (УО) для класів ДУ і базової залежності (БЗ) для РА разом з їх безперервно-груповими перетвореннями;
- розроблено чисельні критерії оцінювання якості моделювання, що враховують глобальні ознаки оброблюваних цінностей;
- створено практично зручну методику побудови ізольованих функцій двох змінних;
- розроблено нову оперативну методику пошуку помилкових замір'їв шляхом збільшення обсягу вибірок при використанні традиційних статистичних критеріїв і заліку в них фізично обумовленої інформації;
- винайдено новий розв'язок задачі опуклого та шматочко-опуклого сплайн-згладжування, зручний в практичному використанні;
- розроблено метод локальної апроксимації чисельних даних загального вигляду.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблена в ній методика реалізує перехід до автоматизованої обробки експериментальних даних (ЕД) і веде до зростання ефективності цієї обробки. Методика реалізована у вигляді КП, який виконує також ручні неформалізовані операції та орієнтований на експлуатацію фахівцем з компресоробудування для широкого кола задач по обробці результатів випробувань компресорів різних типів. Гнучка структура пакету дозволяє формулювати задачі самому користувачеві, так що він має змогу оперативного прийняття рішень, відмінних від формально прийнятих

програмов і рахування їх на подальших етапах модельвання. Висока інтерактивність програмного забезпечення не вимагає від користувача спеціальної комп'ютерної підготовки

Зростання якості обробки результатів випробувань дозволило спростити методику їх проведення з технічної точки зору і знизити вимоги до їх точності без зниження точності отриманої ММ, яка має такі суттєві переваги: простота, фізична обумовленість, малі вимоги на ресурси ЕОМ, значну швидкодій при достатній точності і, через це, є зручною як вхідна модель при розв'язанні задачі параметричної ідентифікації компресора, а також при її залученні до САПР ГТД, наприклад, як ММ компресора при його узгодженні з турбіною.

Обґрунтованість і вірогідність результатів підтверджується зіставленням і збігом запропонованих у роботі апроксимацій характеристик реальних приладів з апроксимаціями, що отримані іншими методами і прийняті як паспортні характеристики, при чому досягнуто наявного збігу запропонованих апроксимацій з уявленнями фахівця про їх фізично обумовлену поведінку, а також коректністю розроблених ММ, доказів теорем та проведенням чисельних експериментів.

Впровадження. Розроблена в дисертації методика обробки результатів натурних випробувань компресора ГТД впроваджена в 1991-1994 р. на Миколаївському НВО "Машпроект" для даних, що отримані при натурних випробуваннях восьмиступеневого компресора високого тиску КВД80, і в 1994 р. на Харківському НВО "Турбоатом" для даних, отриманих при випробуваннях відцентрової тягодуттєвої машини ТДМ-17ТА. Крім того, методичку опуклого та шматочно-опуклого згладжування впроваджено в 1992 р. для аналізу експериментальних даних по біоелектричній активності кори головного мозку піддослідних тварин і

людини в Інституті кріобіології і кріомедицини НАН України.

Апробація роботи. Основні результати дисертації обговорювались на 9-ій школі-семінарі молодих вчених і спеціалістів "Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (Москва, РФ, 1993 р.), на Другій міжнародній конференції "Нові технології в машинобудуванні" (Рибаче - Харків, 1993 р.), а також на постійному семінарі кафедри інформатики та програмного забезпечення автоматизованих систем ХАІ.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 робіт, серед них 6 депонованих статей і 2 тези доповідей. Результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримано автором під керівництвом **К.Т.Н.,** **доцента** Кожухова В. Д. у співавторстві з Чернишовим Ю. К.

Особисто автором доведено властивості зберігання асимптотичної поведінки запропонованих перетворень [1]; виконано необхідні розрахунки на ЕОМ для експериментального підтвердження гіпотези про оптимальну кількість вузлів згладжування параболічними сплайнами [2]; отримано співвідношення, що реалізують алгоритм опуклого згладжування і проведено тестові обчислення на ЕОМ [4]; поставлено задачу згладжування параболічними сплайнами, сформовано матрицю системи лінійних рівнянь і сформульовано алгоритм її розв'язання [6]; розроблено значну частину математичних алгоритмів по моделюванню компресора, виконано їх програмування, розроблено концепцію управляючого інтерфейсу, його програмування і відладка, написано графічну частину пакету [7]; виведено співвідношення для перетворень УО ДХ, доведено їх безперервно-груповий характер і єдиність для прийнятих класів перетворень [8].

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі

вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 93 найменувань. Обсяг роботи - 150 сторінок машинодрукарського тексту, 32 малюнка і 10 таблиць, усього 191 сторінка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

У першому розділі наведено аналітичний огляд робіт, присвячених читанням натурни: випробувань компресорів, загальним концепціям САМ компресора, його місця в процесі автоматизованого проектування, а також засобам представлення отриманих моделей в САПР ГТД. Розглянуто джерела, пов'язані зі специфікою об'єкту моделювання - компресором, наведено відомості про технічні особливості його натурних випробувань та основні вимірювані параметри: приведені оберти ротора - $n_{пр} \in [0, N_{max}]$, витрату повітря - $G_{пр}$, ступінь підвищення тиску - π_k^* , ККД - η_k^* і D_0 - параметр положення дроселя. Загальною САМ моделлю можна вважати сіткову модель:

$$F(n_{пр}, G_{пр}, \pi_k^*, \eta_k^*, D_0) = 0. \quad (1)$$

DX - це залежності $G_{пр}(n_{пр})$, $\pi_k^*(n_{пр})$, $\eta_k^*(n_{пр})$ при фіксованому значенні D_0 . Нехай kdd - кількість DX , а mdr_i - кількість точок i -тої DX , що відомо з експерименту. PX - залежності $\pi_k^*(G_{пр})$ та $\eta_k^*(G_{пр})$ при $n_{пр} = const$. Аналіз джерел дозволив формально описати найважливіші фізично обумовлені вимоги, що мають бути виконані для результативної моделі:

- 1) польовий характер DX (відсутність перетинань);
- 2) $n_{пр} + N_{max} - 0$, $G_{пр}^i(n_{пр}) + G_{max} - 0$, $i=1, kdd$.

$$3) G_{np}^i(0) = 0, \quad \left. \frac{dG_{np}^i(n_{np})}{dn_{np}} \right|_{n_{np}=0} = 0, \quad i=1, \overline{kdd};$$

$$4) \pi_{\kappa}^{*i}(0) = 1 \quad \left. - \frac{d\pi_{\kappa}^{*i}(n_{np})}{dn_{np}} \right|_{n_{np}=0} = 0, \quad i=1, \overline{kdd};$$

5) гілки РХ $\pi_{\kappa}^{*i}(G_{np})$ при $n_{np} = \text{const}$ мають бути стуклими;

6) нахил гілок РХ $\pi_{\kappa}^{*i}(G_{np})$ має зростати зі зростанням n_{np} ;

7) гілки РХ $\eta_{\kappa}^{*i}(G_{np})$ мають бути унімодальні при умові $\eta_{\kappa}^{*i} < 1$;

8) лінії постійних значень ККД мають відповідати уявленням фахівців про їх поведінку.

Зроблено висновок, що для врахування ознак ДХ та РХ доцільно спростити модель (1) і будувати її у вигляді:

$$\pi_{\kappa}^{*i} = f_1(n_{np}, G_{np}), \quad \eta_{\kappa}^{*i} = f_2(n_{np}, G_{np}). \quad (2)$$

Розглянуто джерела, присвячені моделюванню РХ комп'ютера за ЕД. Більшість робіт пов'язана з обробкою ЕД, що здійснюється в площині РХ. Проведення випробувань в галузі ДХ, хоч і є технічно простішим, але виконується рідко в зв'язку зі складністю побудови РХ за ДХ. Аналіз праць дозволив дійти висновку про перспективність ММ, в яких вдається з достатнім рівнем точності описати почта ДХ та РХ за допомогою малолічельності параметризованих залежностей. Основною стає задача пошуку найбільш вдалої параметризації. Досі при пошуку параметризації, що зменшують обсяг ММ, не ставали задачі привнесення в них фізично обумовлених властивостей об'єкту.

Проаналізовано джерела, основним з яких є монографія В. С. Файна, пов'язані з тими аспектами безперервно-групової теорії та теорії розпізнавання зображень, які відповідають концепції опису сімей ДХ РХ в поняттях класів безперервних

кривих, ознаками яких є сформульовані фізичні властивості характеристик компресора, а носіями ознак - спеціально введені еталони. Тоді самі характеристики - представники класів будуть відповідати певному значенню безперервно змінюваного параметра перетворення еталону, а пошукуваними параметризаціями можуть бути групи Лі такі, що при їх дії на еталони залишаються незмінними ознаки обраного класу характеристик.

Наочно видно, що в зв'язку зі статистичним характером ММ, необхідним є розв'язання задач апроксимації на всіх етапах моделювання, при чому придатними є лише ті методи інтерпольовання та згладжування, що зберігають глобальні властивості вхідних даних, найважливішою з яких є опуклість. Зроблено висновок, що найперспективнішими методиками апроксимації вважаються ті, що використовують сплайн-функції. Задачі опуклого інтерпольовання та згладжування сплайнами актуальні самі по собі, незважаючи на природу оброблюваного чисельного матеріалу. Існує багато праць по розробці методів опуклого сплайн-інтерпольовання аналіз яких дозволяв обрати для даної роботи інтерпольовання параболічними опуклими сплайнами з проміжними вузлами (ПОС). Задача апроксимації залежностей, виникаючих при САМ компресора, не задачею опуклої інтерполяції за опуклою сіткою вузлів, бо, через помилки експерименту, коректно поставити таку задачу взагалі неможливо і мова може йти лише про згладжування, яке має давати опуклі конфігурації для даних, що не є опуклими за критерієм зберігання знаку різницевих відношень другого рівня. Зроблено висновок, що задача опуклого згладжування для довільної сітки вузлів є новою актуальною задачею, а особливості оброблюваного ЕД вимагають згладжування, що не засноване на інтерпольованні.

Необхідною умовою того що розробляема ММ компресора

вважатиметься вдалою, є можливість за її допомогою оцінювати якість отриманих замірів і відбракувати грубі помилки експерименту. Було проведено аналіз двох рел, що дають статистичні критерії для розв'язання подібних задач, і, виходячи з специфіки ЕД, було зроблено висновок про доцільність використання саме рангових статистичних критеріїв.

У другому розділі наведено методику САМ компресора ГТД.

У пункті 2.1. наведено методику опису класів ДХ на базі введення їх еталонів - УО. Безперервні ДХ описані як ПОС-інтерполяції по експериментальних вузлах. УО їх полів введено як ПОС-інтерполяції результату усереднення існуючих ДХ. Виконання фізичних властивостей ДХ досягнуто шляхом належного завдання вузлів інтерполяції і похідних в них на межах інтервалу вимірювань. Для введених УО обрано класи безперервно-групових перетворень з умов зберігання фізичних властивостей ДХ, отримано самі перетворення, доведено їх єдиність для даних класів перетворень і перевірено зберігання фізичних властивостей. Модель ДХ має вигляд (наведені прямі та зворотні співвідношення):

$$G_{\text{пр}} = \frac{G^0(t+1)G_{\text{макс}}}{2tG^0 + (1-t)G_{\text{макс}}}, \quad t_{01} = \frac{(G_{\text{пр}} - G^0)G_{\text{макс}}}{2G^0G_{\text{пр}} - (G^0 + G_{\text{пр}})G_{\text{макс}}} \quad (3)$$

$$t \in (-1, 1).$$

$$\pi_k^* = s(\pi^0 - 1) + 1, \quad s_{01} = (\pi_k^* - 1)/(\pi^0 - 1), \quad s \in (0, +\infty) \quad (4)$$

$$\eta_k^* = \eta^0 + s1, \quad s_{01} = \eta_k^* - \eta^0, \quad s1 \in (-\infty, +\infty). \quad (5)$$

G^0, π^0, η^0 - точки еталонів, а t, s і $s1$ - параметри перетворень.

Проаналізовано питання найкращого вибору УО ДХ. Показано, що при існуючій рівні помилок і кількості вимірювань обраний простіший шлях їх побудови не веде до загублення то-

чності, і можна вважати, що t , s і s_1 дорівнюють константам.

Запропоновано загальну методику кусочно-опуклого згладжування довільних даних з невідомими похибками вимірювань, яка заснована на використанні кусочно-параболічних сплайнів дефекту 1. Доведено, що процедура згладжування полягає в розв'язанні системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), порядок якої дорівнює $5m-2$, де m - кількість вузлів сплайна, що будується. Показано, що матриця СЛАР має блочний вигляд, на базі чого розроблено алгоритм розв'язання СЛАР, при чому кількість виконуваних операцій лінійно залежить від розмірності СЛАР.

У пункті 2.2 аналізується модель ДХ з пункту 2.1 в реальній ситуації при наявності помилок вимірювань для статистично малих виборок. Розроблено алгоритми впорядкування ДХ і побудови їх реальних полів по ЕД і в'явлення грубо помилкових замірів. Розв'язання цієї задачі починається зі встановлення найбільш ймовірного впорядкування ДХ за допомогою методу, що використовує суми рангів, виставлені "експертами", в ролі яких виступають перерізи ПОС-інтерпольованих експериментальних ДХ лініями $n_{пр} = \text{const}$. Пошук грубо помилкових точок базується на фізично об'єктованому критерії відсутності перетинань інтерпольованих ДХ. Недоліками цих алгоритмів є їх залежність від способу інтерпольування ДХ. Щоб уникнути цього, розроблено алгоритм, що реалізує обчислення рангів на основі модифікованого методу парних порівнянь. При виставленні критеріїв, заснованих на парних порівняннях і "експертному" опитуванні, в явилася задовільний збіг.

У пункті 2.3 розглянуто проблеми забезпечення фізично обумовлених властивостей РХ, які можна промодельовати за допомогою БЗ - залежностей $s(t)$ і $s_1(t)$. Вимоги до РХ

перетворень уО ДХ. Основною вимогою залишається опуклість. Викладено новий загальний алгоритм опуклого згладжування, що заснований на редукції різницевих відношень другого рівня. Якщо вони зберігаються в наборі $((t_i, p_i'')$, $i = \overline{1, n}$), то для випадку вимоги опуклості, редукція з параметром $\gamma \geq 0$ виконується за формулою:

$$p_i'' = \begin{cases} p_i'' & \text{якщо } p_i'' \leq 0, \\ -\gamma & \text{якщо } p_i'' > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Початкове наближення $((t_i, Y_i)$, $i = \overline{1, n}$) будуватиметься двократним чисельним інтегруванням за набором $((t_i, p_i'')$, після чого воно матиме заданий характер опуклості. Наступним кроком алгоритму є використання МНК для обчислення параметрів перетворення α, a, β конфігурації $((t_i, Y_i)$), що мінімізують критерій:

$$Q(\alpha, a, \beta) = \sum_{i=1}^n (\alpha Y_i + at_i + b - s_i)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

після чого виникають опуклі сітки вузлів, що задають БЗ:

$$\begin{aligned} \Delta_{t,s} &: ((t_i, s_i), t_i < t_{i+1}, s_i = s(t_i), i = \overline{1, n}), \\ \Delta_{t,s_1} &: ((t_i, s_1), t_i < t_{i+1}, s_1 = s_1(t_i), i = \overline{1, n}). \end{aligned} \quad (8)$$

У пункті 2.4 будуватимуться РХ на базі отриманих БЗ. Для побудови гілки $\pi_{\kappa}^*(G_{np})|_{n_1}$ з ktw точок при $n_{np} = n_1$, $t \in [t_0, t_m]$, обчислюємо:

$$t_i = t_0 + h_t(i-1), s_i = S_{D_{\text{пос}}}(t_i)|_{\Delta_{t,s}}, \quad i = \overline{1, ktw}. \quad (9)$$

де h_t - крок зміни параметру t при переміщенні по БЗ $s(t)$. Значення t_i, s_i з (3) - (4) задають ДХ $G_{np}^i(n_{np})$ і $\pi_{\kappa}^{*i}(n_{np})$, які використано для обчислення координат i -ої точки гілки.

$\pi_{\kappa}^*(G_{np})|_{n_1}$ Доведено, що для опуклої БЗ $s(t)$ в реальному інте-

рвалі побудови гілок РХ використаний алгоритм зберігає ознаку опуклості. Гілки РХ $\eta_x^*(G_{np})$ будуються аналогічно, лише використовується БЗ $\xi_1(t)$ і формула (5) замість (4).

Оцінювання якості побудови РХ і шляхів його підвищення проводиться на заключній стадії моделювання. При цьому адекватність отриманих РХ вважається достатньою для прийняття моделі взагалі та базис для уточнення опису ДХ. Для оцінки адекватності побудови РХ запропоновано "лекальний" критерій, за допомогою якого уточнюється положення конкретної ізодроми - "лекала" - ламаної \bar{L} , що будується за формулою (3) на основі наявних БЗ, тобто $\bar{L} = \eta_x^*(G_{np}) \Big|_{n_1} : ((x_i, y_i), i = \overline{1, k, l, w})$; де точки (x_i, y_i) є вершинами ламаної \bar{L} , а сама \bar{L} апріорно належить класу РХ з відомими ознаками. За допомогою "лекала" апроксимується дискретна конфігурація $K: (K_j = (x_j^*, y_j^*), j = \overline{1, n})$, отримана перерізачи полів ДХ лінією $n_p = n_1$. Конфігурація K є запропонованим до розпізнання представником класу РХ, який з наслідком помилок вимірювань не зберігає його ознак. Введено функціонал якості, в основі якого - критерій відстані від точки K_j до ламаної \bar{L} (функція $\rho(\bar{L}, K_j)$), а процедур розпізнання є пошук параметрів перетворень, що зберігають ознаки класу РХ, ламаної \bar{L} три мінімізації:

$$Q(\alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y) = \sum_{j=1}^n \rho(\bar{L}, K_j) \rightarrow \min, \text{ де } \quad (10)$$

$$\bar{L} : ((\tilde{x}_i, \tilde{y}_i))^T = (\alpha_x(x_i - \beta_x), \alpha_y(y_i - \beta_y))^T, i = \overline{1, k, l, w}. \quad (11)$$

З метою обґрунтування працездатності алгоритму чисельного розв'язання задачі оптимізації (10) - (11) проведено тестові обчислення, в основі яких - метод деформованого багатогранника Недлера-Мідла. Розрізняються ситуації $\alpha_x, \alpha_y \rightarrow \text{ваг}$ та $\alpha_x, \alpha_y = \text{const}$. Для всіх випадків було досягнуто сходин-

мість оптимізаційного процесу до рішення, що не залежить від початкової точки і є адекватним з практичної точки зору.

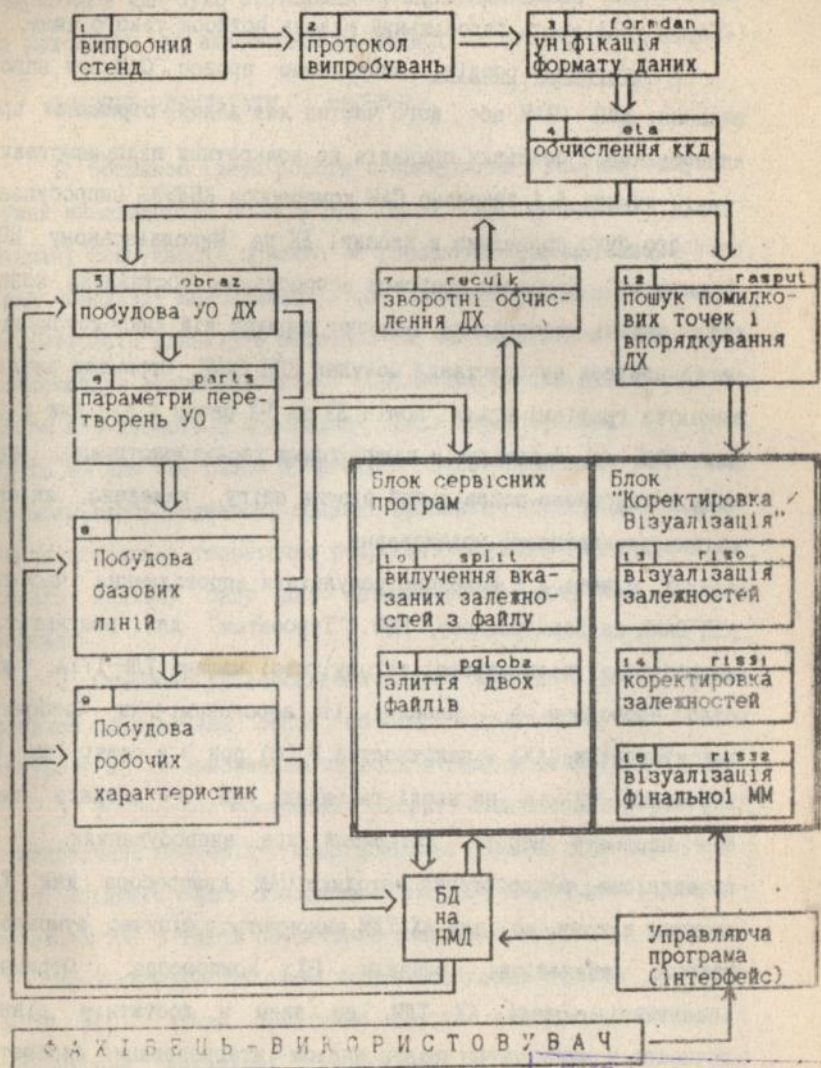
Параметри розв'язання (10) - (11) дають уточнені положення моделюємої гілки РХ. Використання для них зворотніх формул (3) - (5) уточнює результуючі БЗ, які є кінцевим моделлю РХ, на базі якої будуються лінії рівних значень ККД.

Третій розділ присвячений опису комплексу прикладних програм по статистико-аналітичному моделюванню компресора за результатами його натурних випробувань (КПП САМК). Алгоритмічну основу КПП САМК складають методи другого розділу роботи. КПП САМК розроблено для ПЕОМ IBM PC в системі об'єктно-орієнтованого середовища TURBO PASCAL- 6.0. Використовувачем пакету є фахівець з компресоробудування, який на базі свого професійного досвіду формує певне коло задач по обробці результатів випробувань і САМ компресора і вирішує їх за допомогою КПП САМК. Управляючий інтерфейс підтримує два режими: автоматичний та автоматизований. У кожному них оперативно відсліджується хід моделювання з використанням графіки. В автоматизованому режимі є можливість прийняття користувачем рішень, відмінних від прийнятих ЕОМ, на кожному з етапів моделювання і врахування їх на подальших етапах. Загальна кількість пам'яті КПП САМК перевищує обсяг оперативної пам'яті простіших моделей ПЕОМ, тому необхідним є розподіл програми на окремо завантажувемі частини, кожна з яких має алгоритмічно закінчений вигляд і розв'язує окрему задачу. Загальна структура КПП САМК наведена на малюнку 1.

Модулі КПП САМК зв'язані за допомогою файлів даних розробленого уніфікованого формату. Фізичний зміст інформації закодовано в іменах файлів.

При розробці графічної частини КПП САМК проаналізовано

Малюнок 1. Загальна інформаційна та файлова структура
КПІ САМК.



питання, пов'язані з можливим загубленням точності обчислень при переході від математичних координат ММ к графічним і навпаки. Зроблено висновок, що існуючі графічні драйвери (ЕGA та VGA) мають задовільний рівень похибок такого типу.

У четвертому розділі висвітлено процес САМ при впровадженні КПП САМК або його частин для даних, отриманих при випробуваннях реальних приладів на конкретних підприємствах.

У пункті 4.1 виконано САМ компресора КВД80, випробування якого було проведено в площині ДХ на Миколаївському НВО "Машпроект". Наведено протокол випробувань, поставлено конкретні задачі моделювання, описано порядок дій використовува-ча та порядок використання модулів КПП САМК. Отримано аналітичні та графічні моделі полів ДХ та РХ разом з лініями рівних ККД, які порівняно з паспортними характеристиками, при чому встановлено задовільний рівень збігу, наведено якісні оцінки адекватності моделювання.

У пункті 4.2 наведено результати впровадження частини КПП САМК на Харківському НВО. "Турбоатом" для результатів випробувань відцентрової тягодугцевої машини ТДМ-17ТА, які було проведено в площині ІБ аеродинамічних (робочих) характеристик (АХ) - залежностей $P_v(Q)$ при $\theta = \text{const}$, де P_v - різниця тисків на вході та виході ТДМ, Q - витрата газу, θ - параметр мережі, змінюєий при випробуваннях. Ви-правданість використання методики САМ компресора для ТДМ полягає в т ч у, що для АХ ТДМ виконуються фізично зумовлені ознаки, аналогічні ознакам РХ компресора. Отримано аналітичні моделі АХ ТДМ, по яким з достатнім рівнем точності можливо обчислювати шляхом інтерполювання параметри ТДМ для довільної точки.

Для ТДМ є в наявності паспортні характеристики, побудо-

вані вручну на базі детально проведених випробувань при всіх можливих режимах її роботи, які вважались точними. Ці характеристики ТДМ було зіставлено з апроксимаціями, отриманими за методиком, що виносяться на захист, і досягнуто їх збіг.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.

1. Основною ідеєю роботи є врахування фізично обумовлених властивостей об'єкту при його САМ нульового рівня. Вказані властивості описано як глобальні формалізовані ознаки чисельних апроксимацій, що складають модель. Вдалося мінімізувати кількість залежностей, що вводяться саме для моделювання вказаних ознак і обмежитися однією лінією - етапом для кожного з модельованих полів характеристик (УО для ДХ та БЗ для РХ) разом з простими перетвореннями етапів, що зберігають модельовані ознаки. Прийнята концепція моделювання дозволила теоретично розробити цілісну методику, що оклала надійну базу для автоматизації розв'язку задачі взагалі.

2. Створено універсальний апарат чисельної формалізації фізично обумовлених ознак об'єкту моделювання та способи контролю за їх виконанням на всіх етапах моделювання.

3. Розроблено ефективний апарат, заснований на рангових статистичних критеріях, який враховує фізично обумовлені ознаки, збільшує обсяг оброблюваних виборок і дозволяє впорядковувати ДХ, а також оперативно знаходити помилкові заміри.

4. Розв'язані загальні задачі побудови опуклих апроксимацій, які дають практично зручні алгоритми (опуклого згладжування, локальної апроксимації), які актуальні для статистичної обробки даних, незважаючи на їх походження.

5. Розвинуті теоретичні положення доведуть до належної

програмної розробленості з використанням сучасних засобів комп'ютерного сервісу і з наданням можливостей для активного втручання фахівця-використовувача в процес створення моделі.

6. При застосуванні розроблених методик САМ компресора і ТДМ реалізовано перехід від ручної обробки даних до автоматизованої, при чому зроблено наступні висновки:

а) великий рівень помилок, мала кількість вимірювань і обмеженість області випробувань компресора не дозволяють отримати безумовні відносні оцінки точності модельвання шляхом порівняння побудованих апроксимацій з паспортними характеристиками, навіть при повному їх збізі, через те, що останні отримані вручну і відсутня інформація про їх точність. Для компресора можна вважати, що отримані в роботі апроксимації РХ - найкращі з можливих, бо вони мінімізують сумарну середньоквадратичну відстань від ЕД та безумовно відповідають уявленням фахівця про їх фізично обумовлену поведінку;

б) детальні випробування ТДМ дозволили отримати її точні паспортні АХ, що дало змогу оцінити точність застосованих алгоритмів. Так, при оптимальному підборі лекала АХ, досягнута відносна похибка наближення паспортних АХ, що не перевищує 2-4%. Побудована модель АХ дає можливість з необхідною точністю перейти до прямокутної сітки, що зручно для застосування стандартних методів двовірного інтерпольвання;

в) впроваджене САМ компресора та ТДМ дозволяє зменшити обсяг випробувань і технічно зпростити методику їх проведення (для компресора), залишаючи задовільною точність отриманих моделей.

7. Економічність і простота отриманих моделей задовільної якості дозволяє їх ефективне використання вклучення до САПР, розв'язок задач діагностики та ідентифікації

змодельованих приладів, екстраполяції та інтерпольвання.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чернышев Ю. К., Мирошниченко Г. А. Построение обобщенного образа характеристики компрессора с помощью группового преобразования плоскости, сохраняющего асимптоты. Харьк. авиац. ин-т. - Харьков. 1991. Деп. в ВИНТИ 09.08.91, N 3410-В91. - 6 с.

2. Чернышев Ю. К., Мирошниченко Г. А. Оптимизация количества узлов сглаживания кусочно-параболическими сплайнами. Харьк. авиац. ин-т. - Харьков. 1991. Деп. в ВИНТИ 09.08.91, N 3409-В91. - 6 с.

3. Мирошниченко Г. А. Гармонические сплайн-функции и их применение для аппроксимации полей. Харьк. авиац. институт. - Харьков. 1991. Деп. в ВИНТИ 09.08.91, N 3411-В91. - 16 с.

4. Чернышев Ю. К., Мирошниченко Г. А. Решение задачи построения выпуклой дискретной регрессионной конфигурации. Харьк. авиац. ин-т. - Харьков. 1993. - 9 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 10.03.93, N 415-Ук93.

5. Мирошниченко Г. А. Решение задачи построения кусочно-выпуклой дискретной регрессионной конфигурации. Харьк. авиац. ин-т. - Харьков. 1993. - 9 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 10.03.93 N 416-Ук93.

6. Мирошниченко Г. А., Чернышев Ю. К. Алгоритмы кусочно-параболического сглаживания данных, оптимальный по количеству выполняемых операций // Харьк. авиац. ин-т. - Харьков: 1993. - 11 с. - Деп. в ГНТБ Украины 17.06.93, N 1175-Ук93.

7. Мирошниченко Г. А., Чернышев Ю. К. Комплекс программ по синтезу обобщенного образа рабочих характеристик компрессоров ГТД и полей течений с помощью кусочно-выпуклых сплайн-функций // Современные проблемы газодинамики и тепломассо-

обмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тез. докл. 9 школы-семинара молодых ученых и специалистов. - М.: изд. МГТУ, 1993. - с. 65 - 66.

В. Кожухов В. Д., Мирошниченко Г. А. Описание полей дроссельных характеристик компрессоров ГТД с помощью преобразования обобщенных образов характеристик. // Proceedings Second International Conference "New Leading-edge Technologies in Machine Building". Rybachiv, Ukraine, 1993. -с. 208 - 210.

Summary

Miroshnichenko G. A. "Statistical-mathematical modeling of the compressor GTE on the base of group transformation of etalons of drossel and working characteristics".

The dissertation is a manuscript presented on competition for academic degree of technical sciences candidate by speciality 05.13.02 - mathematical modeling in scientific researchments. Institute for problems in machinery of the Ukrainian NAS, Kharkov, 1995.

8 works which are defended contain the metodics of statistical-analitical modeling of the compressor basing on results of its testing as working characteristics. The mathematical model is developed with minimum number of dependances which take into account the formalized generalization of the experience on physically caused behavior of compressor characteristics. The metodics developed is realized as a complect of computing programs used for the modeling of real objects with results that admitted adequate.

Аннотация.

Мирошниченко Г. А. "Статистико-математическое моделирование компрессора ГТД на основе групповых преобразований

эталонных реальных и рабочих характеристик".

Диссертация является рукописью на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.02 - математическое моделирование в научных исследованиях. Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, 1995.

Защищено 8 работ, которые содержат методику статистико-аналитического моделирования компрессора по результатам его испытаний в виде рабочих характеристик. Осуществлено построение математической модели, минимальной по количеству зависимостей, позволяющей формализованное обобщение опыта специалистов с физически обусловленным поведением характеристик компрессора. Разработанная методика реализована в виде комплекса программ, использовавшегося для моделирования реальных объектов, результаты которого признаны адекватными.

Ключевые слова: математичне моделювання, компресор, опуклість, клас характеристик, групова перетворення, еталон.

В оригинале текст не читается из-за перевернутого изображения.

Низкокачественная обратная проекция текста с оборотной стороны документа, содержащая информацию об авторе и месте публикации.

1151111

AB 32.763