

Харківський авіаційний інститут  
імені Н.Є. Жуковського

На правах рукопису  
УДК 621.771

**Леховіцер Віктор Олександрович**

**Дослідження і розробка технології контролю  
геометрії вентиляторних лопаток ГТД з  
урахуванням пружних деформацій при вимірюванні**

Спеціальність 05.07.04

Технологія виробництва  
літальних апаратів.

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук



Харків — 1996 р.



Робота виконана на підприємстві «Мотор Січ»

Науковий керівник — академік АІН України  
доктор технічних наук  
Богуслав В.О.

Науковий консультант — доктор технічних наук  
Ободан В.Я.

Офіційні опоненти — професор, доктор технічних  
наук Долматов А.І.,  
кандидат технічних наук  
Корзинкін С.Д.

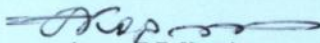
Провідна організація — Запорізьке машинобудівне  
конструкторське бюро  
«Прогрес»

Захист дисертації відбудеться «01» «листопада» 1996 р.  
о 14 год. 00 хв. в ауд. 427 головного корпусу на засіданні  
спеціалізованої ради 02.27.06 у Харківському авіаційному інституті  
ім. Н.Є. Жуковського за адресою:  
310070, м. Харків, вул. Чкалова, 17, Харківський авіаційний інститут  
ім. Жуковського.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий «23» «вересня» 1996 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої Ради

  
професор Г.Л. Корнілов

## 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність проблеми

Підвищення надійності, точності, а також зменшення трудомісткості виготовлення і контролю деталей і вузлів ГТД є найважливішими завданнями виробництва авіадвигунів. У значній мірі це відноситься до виробництва лопаток, частка яких у загальній кількості деталей ГТД складає в середньому 50 %, а трудомісткість досягає 35% від трудомісткості двигуна.

Для розв'язання зазначених завдань на моторобудівних підприємствах постійно удосконалюється обладнання і технологія виготовлення і контролю, вводяться в дію металообробні верстати з ЧПУ, робототехнічні системи, створюються автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва (АСТПВ).

До складу сучасної АСТПВ «Лопатка» входять: підсистема об'ємного математичного моделювання поверхонь пера лопаток; підсистема автоматизованого проектування технологічного оснащення; підсистема автоматизованого оформлення креслень лопаток та оснащення; підсистема підготовки керуючих програм для виготовлення лопаток і оснащення на верстатах з ЧПУ; база даних лопаток і оснащення; дільниці верстатів з ЧПУ, керованих від ЕОМ, для виготовлення лопаток і оснащення. Всі підсистеми взаємодіють між собою по каналах зв'язку або за допомогою машинних носіїв інформації.

Незважаючи на досягнуті успіхи, технологічний цикл не можна вважати повністю автоматизованим і закінченим, оскільки операції контролю геометричних параметрів лопаток здебільше виконуються вручну.

Сказане особливо відноситься до великогабаритних вентиляторних лопаток, при виготовленні яких використовується ручна праця на фінішних операціях, що визначають точність профілю пера. Контроль профілю пера таких лопаток у цехових умовах у даний час провадиться з використанням шаблонів або спеціально запрофільованих оптико-механічних приладів. Це обумовлює надзвичайну складність технологічної підготовки виробництва і контролю, додержання точності шаблонного господарства, особливо при освоєнні нових виробів чи внесенні змін до профілю пера лопаток, що випускаються.

Для дослідницьких цілей, арбітражних замірів, обміру шаблонів і еталонів застосовуються універсальні координатно-вимірвальні машини (КВМ), що встановлюються, як правило, у спеціальних приміщеннях. Їх застосування не вирішує завдання 100 % контролю геометрії вентиляторних лопаток через обмежену кількість машин внаслідок дорож-

нечі, складності експлуатації і низької продуктивності, необхідності додаткового висококваліфікованого персоналу.

Тому дослідження, спрямовані на удосконалення технології контролю геометрії вентиляторних лопаток шляхом створення спеціалізованих автоматичних засобів контролю цехового рівня, а також на удосконалення традиційних способів є актуальними.

Актуальність теми знайшла своє відображення в планах нової техніки і технічного переозброєння ВО «Моторобудівник» (тепер АТ «Мотор Січ»), розроблених з урахуванням програми ДК з науки і технології України «Розвиток виробничих потужностей по випуску великогабаритних двигунів» і комплексної програми МАП, ВПС, ЦПФ від 02.06.88 «Створення авіаційних двигунів на період до 2000 р.»

#### **Мета і завдання дослідження**

Метою дисертаційної роботи є створення нових технологічних рішень контролю геометричних розмірів деформівних виробів і обладнання для їх здійснення.

Досягнення поставленої мети обумовило необхідність рішення таких наукових та інженерних завдань:

- розробити метод багатоканального вимірювання криволінійних поверхонь пера лопатки, яка розглядається як пружне тіло, що забезпечує автоматизацію, необхідну точність, продуктивність і надійність у цехових умовах;

- розробити спосіб уписування ідеального профілю в реальний, що забезпечує мінімальне значення погрішностей оцінки викривлень і зміщень реального профілю відносно заданого і параметрів профілю у технічно допустимий час;

- розробити принципи створення переналаджувального контрольно-вимірювального оснащення для контролю геометрії складних деталей;

- розробити і впровадити у виробництво нові засоби контролю геометрії лопаток.

#### **Методи досліджень**

При виконанні роботи застосовувались аналітичні та експериментальні методи досліджень, що базуються на теорії точності машин і механізмів, теорії погрішностей, методи скінчених елементів, статистичному моделюванні на ЕОМ.

#### **Наукова новизна**

Розроблена деформаційна модель вентиляторної лопатки при різних умовах закріплення, що знаходиться під впливом точкової сили, і спосіб

оперативного обліку відповідних пружних деформацій у процесі контролю багатоканальними датчиками дотику.

Розроблений спосіб контролю геометричних розмірів деформівних виробів, що забезпечує велику швидкість за рахунок багатоканальності і, в той же час, малий контактний тиск на контрольовану деталь і незначну її деформацію за рахунок нелінійного характеру відновлювальної сили.

Розроблений оптимальний за швидкістю спосіб оцінки відповідності геометрії перерізу точнісним вимогам, заснований на двохетапній процедурі: 1) спочатку швидкому визначенні зміщень і відхилень реального профілю від ідеального за результатами уписування ідеального профілю в одержані координати, заснований на критерії мінімуму с.к.о. та 2) потім, у випадку негативного результату першого етапу, застосуванні мінімаксного критерію до значень максимального відхилення профілю у тіло перерізу.

Розроблена методика розрахунку точнісних характеристик обладнання для реалізації способу.

Розроблена методика автоматизованої оцінки відповідності реального профілю технологічним вимогам.

#### **Практична цінність роботи**

Розвинуті у роботі методи автоматичного високопродуктивного контролю геометричних параметрів пружних тіл, зокрема, лопаток для авіадвигунів, можуть бути використані для побудови широкої гами спеціалізованих координатно-вимірювальних машин контролю геометрії лопастей енергетичних машин, вентиляторів, повітряних двигунів, судових та авіаційних гвинтів та інших виробів складної форми. Практична цінність роботи полягає також у тому, що її результати можуть бути використані і в інших галузях машинобудування при створенні уніфікованого технологічного оснащення, складовою частиною якого є переналаджувальні контрольно-вимірювальні пристрої.

#### **На захист вносяться:**

- спосіб контролю геометричних параметрів деформівних виробів типу лопаток і лопастей;
- методика розрахунку точнісних характеристик обладнання для реалізації способу;
- методика автоматизованої оцінки відповідності реального профілю технологічним вимогам;
- склад, будова і рекомендації по використанню уніфікованого перебудовуваного технологічного оснащення для виробництва і контролю складних деталей двигунів.

### **Практична реалізація роботи**

Проведені дослідження дозволили розробити технологічні рішення, покладені в основу створення системи контролю профілю пера вентиляторних лопаток ГТД типу ВЕНТА, а також уніфікованого оснащення як для підвищення точності і продуктивності виготовлення складних деталей двигунів, так і для контрольно-вимірвальних операцій.

Реалізація результатів досліджень виконувалась шляхом розробки робочої документації на систему контролю профілю пера вентиляторних лопаток до авіадвигунів Д-18Т, Д-36 та Д-436, виготовлення якої завершується у даний час в АТ «Мотор Січ», а також шляхом розробки технічної документації, виготовлення переналаджувальних контрольно-вимірвальних пристроїв і технологічного оснащення та відпрацювання технології їх використання у цехах АТ «Мотор Січ».

### **Апробація роботи**

Основні результати роботи доповідались на засіданнях науково-технічної ради АТ «Мотор Січ», науково-технічних нарадах підприємств галузі, на Всеросійському семінарі «Проблеми динаміки і міцності електро- та енергомашин» в Інституті проблем машинознавства РАН (С-Петербург, 1993), на 2-й Міжнародній конференції «Датчики електричних та неелектричних величин» (Барнаул, 1995), на спільних семінарах та нарадах спеціалістів АТ «Мотор Січ», НВО «Метрологія», НВО «Дніпрочерметавтоматика» та УкрНДІТМ у 1992—1994 р.р. під керівництвом д.т.н. Ободана В.Я. Повністю робота доповідалась на семінарі кафедри технології машинобудування ХАІ.

### **Публікації**

За темою дисертації опубліковано 17 робіт, у т.ч. 10 винаходів. Список основних публікацій наведений у авторефераті.

### **Обсяг та структура роботи**

Реферована дисертація загальним обсягом 176 сторінок складається з вступу, 4 глав, висновків, списка літератури з 89 найменувань, а також 8 додатків на 38 стор.

## **2. ЗМІСТ РОБОТИ.**

У вступі проаналізовано сучасний стан автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва вентиляторних лопаток і обґрунтована актуальність обраного напрямку досліджень, відзначені труднощі створення засобів контролю геометрії профілю пера лопаток, сформульовані мета і завдання досліджень.

У першій главі дисертації за літературними та дослідними даними

досліджені відомі методи контролю геометрії пера лопаток і проведена їх класифікація: на методи порівняння зі зразком, координатні та комбіновані. У свою чергу найбільш сучасні координатні методи поділені на методи послідовного і паралельного (одночасного) вимірювання; останні класифіковані за одночасністю контролю одного перерізу чи всієї поверхні лопатки і за типом датчиків знімання первинної інформації. Крім згаданих ознак координатні методи поділяються за способом базування лопатки (у замку, у замку і технологічній бобищі, математичне базування) і за способом компенсації деформацій лопатки під дією сил (тяжіння або контактних при використанні датчиків дотику).

Порівняння відомих методів та використовуваних датчиків первинної інформації про координати поверхні пера вентиляторних лопаток дозволяє зробити однозначний вибір на користь координатного методу контролю з одночасним (паралельним) вимірюванням одного перерізу з допомогою багатоканальних датчиків дотику (БДД).

Головними достоїнствами обраного напрямку побудови спеціалізованої системи є можливість забезпечення швидкої контролю, автоматизація введення даних про креслярські характеристики геометрії лопатки, повна відмова від необхідності виготовлення зразкових лопаток, шаблонів, стержнів і т.д., що значно спрощує і здешевлює технологічну підготовку виробництва вентиляторних лопаток.

Застосування контактних шупових датчиків дотику робить результат контролю незалежним від стану оброблюваної поверхні пера, в той час як використання оптоелектронних датчиків світлового перерізу неможливе внаслідок дзеркального характеру відображення світла від полірованої поверхні.

Дослідження характеристик вентиляторних лопаток великих ГТД з точки зору контролю геометрії обраним методом показало, що найбільший вплив на конструкцію БДД і власне вимірювальної машини виявляють виступання антивібраційних полицок, податливість лопатки дії поперечних сил, ширина лопатки.

Допустимі відхилення профілю знаходяться у таких межах: плюсові від 30 до 100 мкм, мінусові від 100 до 800 мкм у залежності від типу лопатки і відстані контрольованого перерізу від замка. Допуск на загальне зміщення профілю вздовж осей X та Y і зміщення кромки по осі Y при допустимому розвороті перерізу майже на порядок більше допуску на відхилення профілю, тому визначення допустимої похибки контролю необхідно провадити, виходячи з допуску на відхилення профілю.

У відповідності з прийнятим у технологічному контролі підходом допустима похибка у робочих умовах повинна знаходитись у межах  $1/3...1/5$  від поля допуску на розмір.

Для вентиляторних лопаток встановлений несиметричний допуск на відхилення профілю, причому, плюсовий допуск у 2...8 разів менший від мінусового. Тому для більшої надійності контролю як розрахункове поле допуску будемо брати подвоєний мінімальний плюсовий допуск, тобто  $2 \cdot 30 = 60$  мкм. Тоді похибка вимірювання  $\delta_{\text{вим}}$  у робочих умовах не повинна перебільшувати  $\pm 1/4 \cdot 60 = \pm 15$  мкм.

За аналогією з універсальними КВМ загальна похибка розробленої спеціалізованої цехової системи складається з кінематичної похибки базування лопатки відносно БДД, похибки власне БДД та засобів знімання інформації про його положення, похибки внаслідок пружної деформації лопатки, похибки уписування і обчислювань (всього  $n = 5$  найменувань). У відповідності з принципом оптимального конструювання вимірювальних приладів складові сумарної погрішності  $\delta_{\text{вим}}$  повинні бути по можливості рівними. При статистичній незалежності складових, а в нашому випадку це має місце, допустиме значення кожної з них не повинне орієнтовно перебільшувати  $\pm \delta_{\text{вим}} / \sqrt{5} = \pm 6,7$  мкм.

Швидкодія вимірювання, рахуючи від моменту встановлення лопатки, прийнята порядку 20 с при контролі одного перерізу і 10 хв при контролі всієї лопатки, що в декілька разів менше часу при ручному контролі шаблонами.

Виходячи із вищевикладених вимог до діапазону точності і швидкості контролю зроблений висновок про те, що створення спеціалізованої системи контролю геометрії вентиляторних лопаток є достатньо складним, але реальним завданням, для розв'язання якого необхідне застосування убудованих засобів обчислювальної техніки. На завершення розділу сформульовані основні принципи побудови такого класу систем, конструктивні і метрологічні вимоги до них.

У другій главі розроблений метод та засоби знімання первинної інформації про координати поверхні пера вентиляторної лопатки.

Для вибору основної схеми вимірювання, що дозволяє реалізувати багатоканальний контактний метод вимірювання із зніманням інформації за окремими перерізами, були розглянуті чотири варіанти компонування вимірювальної машини (ВМ): горизонтальне і вертикальне компонування з одним БДД; те ж з двома БДД. Перші два компонування належать до систем з трьома ступенями свободи: 1) поворот лопатки, 2) переміщення БДД вздовж осі Z лопатки, 3) переміщення

одного БДД до лопатки по черзі до спинки та корита після повороту лопатки на  $180^\circ$ . В інших двох компонованнях четвертий ступінь свободи — це переміщення другого БДД вдовж осі Y (переміщення його по осі Z виконується одночасно з першим БДД).

У зв'язку з тим, що у 3-координатній машині на результат вимірювання істотно впливає биття поворотного столу і затискного пристрою, вибір був зроблений на користь ВМ з 4 ступенями свободи і вертикальним розташуванням лопатки, що запобігає вигину лопатки без технологічної бобишки під дією сили тяжіння.

Дослідження точності обраної схеми вимірювання методом аналізу складових сумарної кінематичної похибки показало, що вона знаходиться в межах  $\pm 5,7$  мкм, що відповідає рекомендаціям, одержаним у першій главі, і залишає достатній резерв для останніх складових похибок.

Великий вплив на результат вимірювання контактними щуповими засобами знімання первинної інформації здійснюють податливість лопатки і величина контактної зусилля. Експериментально встановлено, що податливість лопаток 36(436) у крайніх перерізах при консольному кріпленні у замку складає орієнтовно  $0,56$  мкм/г, коли сила прикладається по осі лопатки (для 18 лопатки —  $0,19$  мкм/г). При закріпленні лопатки у замку і бобишці максимальна податливість має місце посередині лопатки і орієнтовно в 20...30 разів менша вищезазначеної.

Контактне зусилля залежить від зусилля затягування  $F_{\text{зат}}$  контактів щупового датчика, і для позолочених контактів, що працюють у цехових умовах, повинне орієнтовно складати 15 г. Тоді при кроці щупів 8 мм і натиснутих всіх щупах повний контактний тиск з однієї сторони складе 250 г для лопаток 36(436) типу і до 500 г для 18 лопатки. Відповідні деформації при консольному кріпленні лопаток доходять до 140 і 95 мкм, що значно більше допущеної величини; при двохопорному кріпленні лопаток ці цифри зменшуються до 5...8 мкм, що також вимагає прийняття заходів для компенсації деформацій лопатки.

Зменшення впливу пружних деформацій лопатки до прийнятої величини може бути досягнуто: 1) суттєвим зменшенням контактної зусилля на лопатку з боку БДД; 2) введенням поправок до результату знімання первинної інформації про положення поверхні пера. Можливий і третій шлях, що об'єднує обидва попередніх; у цьому випадку поправка значно менша і її можна розруховувати з меншою точністю.

Основна ідея зменшення контактної зусилля полягає у створенні БДД з нелінійною силовою характеристикою, шляхом припинення тиску на лопатку тим щупом, який вже торкнувся лопатки (рис. 1).

Експериментальна перевірка і розрахунки показали, що найкращим технічним рішенням, що реалізує таку характеристику, є застосування лінійного електроприводу кожного шупа у вигляді електромагніту постійного струму з замкнутим магнітним потоком (рис. 2). З самого початку шуп знаходиться у попередньому положенні, потім електромагніт підтягує шуп у максимально висунуте положення і стискує контакти шупа (як і до яра) з силою  $F_{зат}$ . Після дотику шупом лопатки відбувається розрив контактів і знеструмлювання електромагніта; подальший тиск цим шупом на лопатку визначається тільки силою тертя  $F_{тер}$  шупа в направляючих. Розрахунок такої електромагнітної системи в процесі притягування якоря шупа зводиться до забезпечення виконання нерівності:

$$F_{ем}(\Delta) > F_{мех}(\Delta),$$

де  $F_{ем}$  — електромагнітна сила притягання якоря,

$F_{мех}$  — сила протидії, рівна сумі  $F_{тер}$  і сил протидії додаткового контакту 2, що забезпечує електричне з'єднання з якорем шупа.

Розв'язання складних рівнянь показало, що мінімальне значення коефіцієнта запасу  $K_{зап} = F_{ем}/F_{мех}$  має місце при

$$\Delta = \frac{1}{6} (4 - a/\Delta_2) \Delta_2 \text{ і дорівнює:}$$

$$K_{зап.хв} = 13,5 [\Delta_2 (2 + a/\Delta_2)^3]^{-1}.$$

Ампер-витки котушки електромагніта вибираються з умови, щоб  $K_{зап.хв} \geq 1,5$  і забезпечувалось надійне притягування якоря.

Електрична схема управління електромагнітом зібрана з застосуванням інтегральних мікросхем і забезпечує після повного висування шупа зменшення струму через електромагніт до струму утримання, що відповідає  $F_{зат} = 15$  г.

Відстань між опорами шупів вибирається при заданому вильоті, виходячи з умови розміщення електромагнітних систем при заданому ході шупа, і потім перевіряється на вигин і зміщення шупа при контролі похилих відрізків профілю.

Експериментальні дослідження дослідного зразка БДД з 32 шупами діаметром 4 мм, розташованими з кроком 8 мм, показали, що контактне зусилля не перевищує 50 г незалежно від кількості шупів, що доторкнулись. Розкид показників БДД при контролі жорсткої поверхні знаходиться в межах  $\pm 2$  мкм із імовірністю  $P = 0,95$ .

Одержана залежність величини поправки  $l_k$  на вигин лопатки. При размиканні контакту  $k$ -му шупі для БДД, зібраного за традиційного схемою:

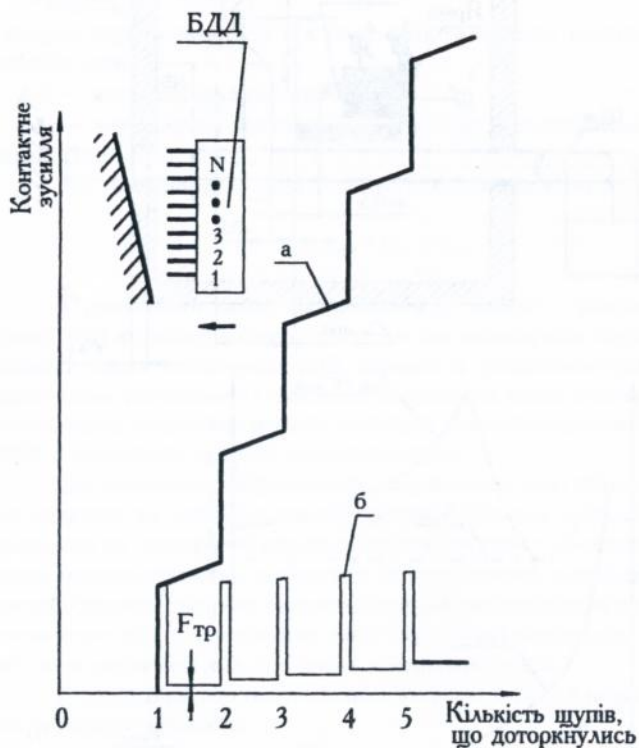


Рис.1. Залежність контактної сили N-канального датчика дотику від кількості доторкнених щупів при контролі похилої площини:  
 а-традиційна схема;  
 б-пропонована схема.

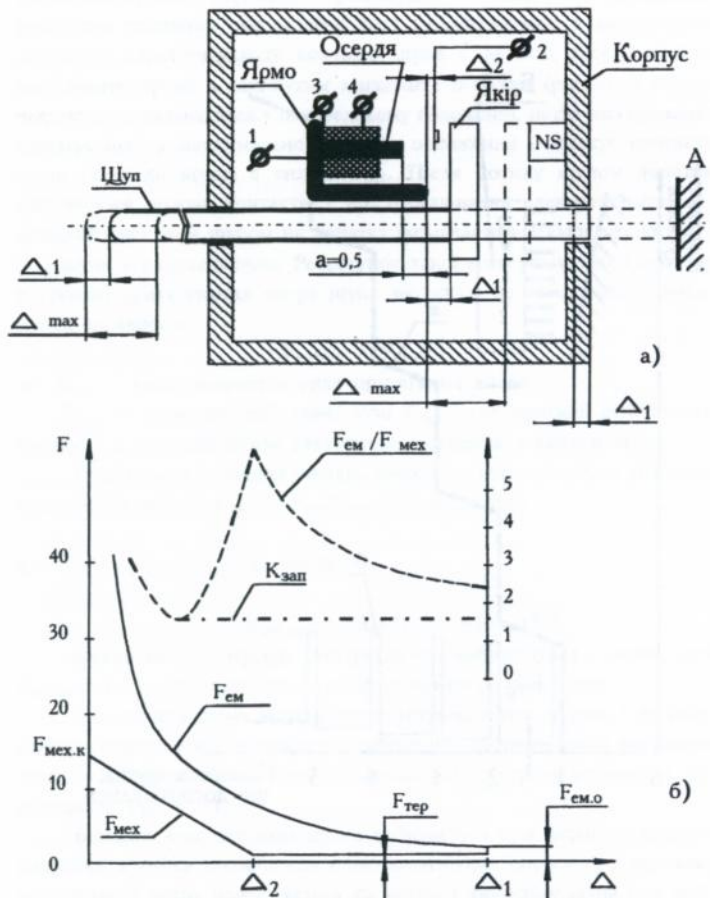


Рис.2. Принцип дії БДД з нелінійною силовою характеристикою:

а-схема механізму і магнітних ланцюгів;  
 б-зусилля при переміщенні якоря  
 (значення в умовних одиницях);

Положення щупа:

- попередне
- висунуте
- втягнуте

$$l_k = \sum_{i=1}^k (F_{\text{зат}} + l_{ik} c) \delta_{ik},$$

де  $l_{ik}$  — переміщення БДД між моментами размикання контактів  $i$ -го та  $k$ -го шупів;

$c$  — жорсткість пружини шупа;

$\delta_{ik}$  — переміщення лопатки в  $k$ -й точці під дією одиничної сили, прикладеної в  $i$ -й точці.

Для запропонованого БДД з нелінійною характеристикою:

$$l_k = F_{\text{зат}} \delta_{kk} + F_{\text{тр}} \sum_{i=1}^k \delta_{ik}.$$

З урахуванням даних про податливість лопатки і контактному тиску БДД зроблений висновок про те, що при двохопорному закріпленні лопатки можна застосовувати БДД, зібраний за традиційною схемою, з одночасним розрахунком і введенням поправок на вигин лопатки. При консольному закріпленні лопатки необхідно застосовувати розроблений БДД з нелінійною силовою характеристикою.

Для визначення коефіцієнтів  $\delta_{ik}$ , за допомогою яких обчислюються поправки на вигин лопатки, розроблена методика їх розрахунку, заснована на застосуванні методу скінчених елементів з чотирьохвузловими ізопараметричними елементами до математичної моделі пера лопатки. Одержані значення квадратної матриці піддатливостей перерізу, елементами якої є переміщення точок перерізу з координатами шупів під дією одиничних сил, що мають координати шупів.

У третій главі розглянуті питання введення в ЕОМ і перетворення первинної інформації.

На основі аналізу різних варіантів знімання даних з БДД зроблений висновок про те, що при використанні сучасних комп'ютерів з тактовою частотою 33 МГц і більше доцільно застосовувати оббігаюче опитування стану контактів шупів (замкнуто/розімкнуто), при якому використовується мінімальний обсяг електронного обладнання і забезпечується достатня швидкість підведення БДД до лопатки — 10 мм/с. Похибка опитування при цьому не перевищує одиниці молодшого розряду обчислень, тобто 1мкм.

Розроблена процедура уписування ідеального профілю в реальні відліки, яка включає два етапи. На першому етапі уписування здійснюється за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення, потім, у випадку негативного результату першого етапу, тобто виходу звітів за допуск, переходять до другого етапу — уписуванню за мінімаксним

критерієм стосовно до значень максимального відхилення профілю в тіло перерізу (критерій  $M^-$ ). Послідовність положень уписуваного перерізу при різних критеріях уписування ілюструється рис. 3.

З рис. 3 наочно видно, як перехід до одностороннього мінусового мінімаксного критерію  $M^-$  дозволяє вийти з оцінки «непоправний брак перерізу» (рис. 3а), одержаний при використанні СКО критерію, і перейти до оцінки «брак поправний», після чого зняти лишки металу зі спинки і одержати придатний переріз. Слід, однак, відзначити, що використання  $M^-$  критеріїв збільшує час пошуку положення найкращого уписування, що підтвердилось статистичним порівняльним моделюванням роботи різних критеріїв. За результатами моделювання можна рекомендувати такі значення кроків при уписуванні: 10 мкм по осі  $X$ ;  $1/20$  значення максимального відхилення на попередньому кроці — по осі  $Y$ ; 0,1 кутової хвилини — по  $\phi$ . При цьому забезпечується час виконання двохетапної процедури 0,4 с на ЕОМ с процесором 486 ДХ4 при тактовій частоті 100 МГц.

Визначення ширини профілю  $B$  провадиться за допомогою шупів нижнього ряду, коли лопатка повернена в таке положення, що пряма, яка доторкається до кромки з боку корита, паралельна осі  $Y$ . Відстані  $B_1$  і  $B_2$  кромки від осі  $Z$  визначаються з геометричних міркувань, тому що відомі положення осі  $Z$ , номінальні радіуси кромки і положення дотичних до кромки.

Товщини  $C_1$  та  $C_2$  визначаються на заданій відстані від кромки, як відстань між кривими, проведеними через декілька (3...4) крайніх замірів по обох кромках перерізу окремо для спинки і корита. Визначення  $C_{\max}$  відбувається за аналогічною схемою, що включає апроксимацію декількох (6...8) відліків у районі очікуваного положення максимуму окремого для спинки і корита та розв'язання завдання проведення між цими кривими окружності максимального діаметра. Виконано розрахунок похибки визначення максимального значення пологої кривої, представлений рівномірними відліками. З використанням результатів цього розрахунку встановлено, що похибка визначення  $C_{\max}$  орієнтовно дорівнює  $2/3$  похибки окремого відліку.

На підставі викладеного розроблена програма обробки первинної інформації про координати профілю, блок-схема алгоритму якої представлена на рис. 4.

**Четверта глава** посвячена опису практичної реалізації результатів досліджень.

Описана конструкція і робота системи контролю профілю пера вентиляторних лопаток ГТД типу ВЕНТА, розробленої з використан-

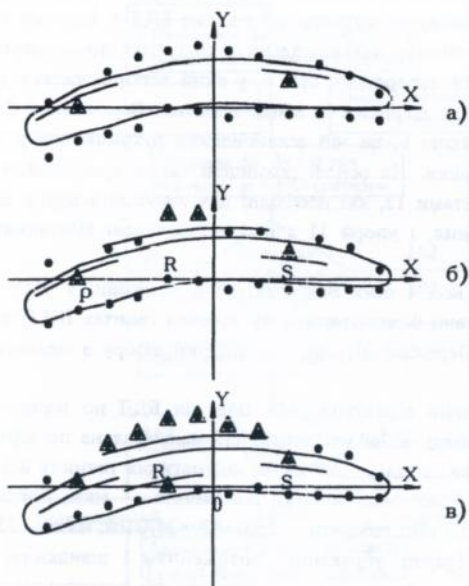


Рис.3. Порівняння результатів уписування ідеального профілю в реальні відліки на основі різних критеріїв:

- а-мінімуму середнього квадрата відхилення;
- б-мінімаксного двостороннього;
- в-мінімаксного одностороннього мінусового.

--- уписаний профіль;

..... допускові лінії;

▲ -точки, що виходять за допуск

ням результатів виконаних досліджень, що складається із власне вимірювальної машини (ВМ), двох БДД, шафи ЧПУ та обчислювального комплексу. Конструктивно ВМ (рис. 5) являє собою коробчасту основу 1, на якій встановлені два стояки 2 з направляючими. По цих направляючих переміщується траверса 3 з двома БДД 4. Кожний з БДД переміщується автономно горизонтально у напрямку до лопатки 5. В основу вмонтований поворотний стіл 6, у який встановлюється затискний пристрій 7 для закріплення замка лопатки. Вертикальні стояки з'єднані зверху балкою 8, на ній встановлений рухомий центр 9 для технологічної бобишки. На основі розміщені також кронштейни 10 з вирівнюючими плитами 12, які необхідні для висування щупів БДД у попереднє положення, і упори 11 з паспортизованою відстанню між ними.

Приводи по всіх 4 осях ВМ електричні позиційні з ЧПУ. Датчики кута встановлені безпосередньо на ходових гвинтах ШГП та поворотному столі. Передбачені міри для вибірки зазору в механізмах і стопоріння.

Основні технічні характеристики ВМ: хід БДД по вертикалі — 900 мм, по горизонталі — 260 мм; швидкість максимальна по вертикалі — 125 мм/с, по горизонталі — 200 мм/с; кінематична точність встановлення БДД у задане відносно лопатки положення — мкм; потужність електродвигунів — 1,7 кВт; габарити — 1500×820×2470 мм; маса — 2300 кг.

Числове програмне управління положенням і швидкістю БДД реалізоване з використанням двох двохканальних електроприводів з широтно-імпульсною модуляцією типу ЕШИМ-1 та блоків програмного управління типу УЦИ50020. Зв'язок системи ЧПУ з ЕОМ по послідовному інтерфейсу RS232.

Багатоканальний датчик дотику розроблений за описаною у другій главі схемою і має такі основні характеристики: кількість × крок щупів верхнього ряду — 32×8, нижнього — 1; виліт щупів у висунутому/втягнутому положенні верхнього ряду — 110/60, нижнього ряду — 80/30 мм; діаметр щупа — 4 мм, радіус закруглення — 2 мм; зусилля при замірі профілю — не більше 50 г, хорди — 100 г; розкид показників на жорсткій поверхні не більше ±2 мкм; напруга і струм живлення +5 В, 10 мА; +15 В, 1,5 А; габарити корпусу 290×100×100 мм; маса — 6,5 кг.

Обчислювальний комплекс зібраний з використанням 486 ДХ4 процесора з тактовою частотою 100 МГц, ОЗУ 8 МБ, НЖМД 420 Мб, КЕШ 256 Кб, кольоровий монітор 14", принтер, 2 послідовних порти. Як блок вводу/виводу дискретних сигналів застосовується модуль

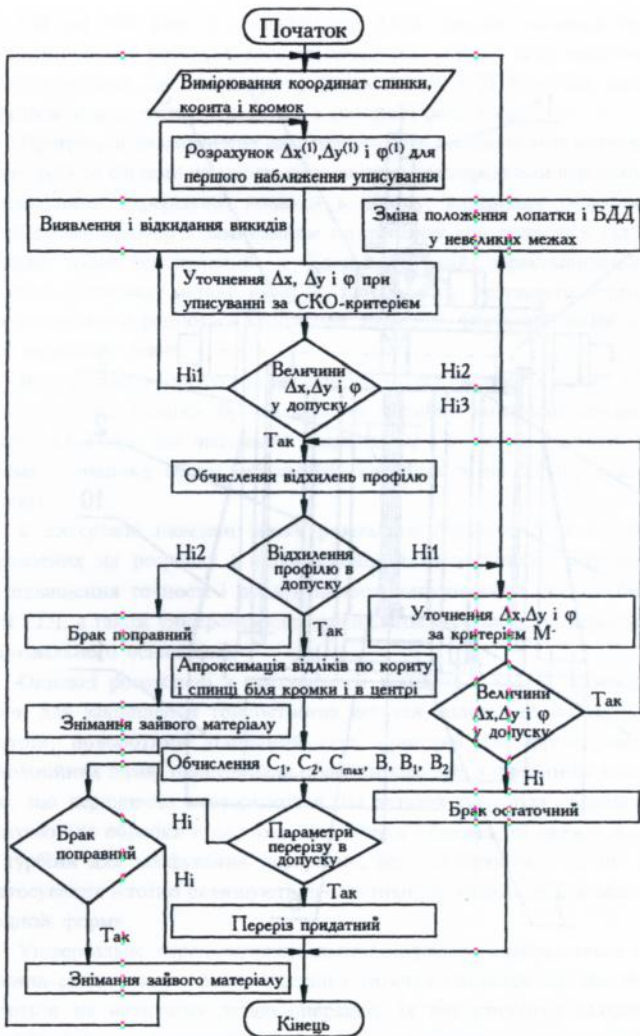


Рис.4. Блок-схема алгоритма обробки первинної інформації при контролі геометрії перерізу пера вентиляторних лопаток.

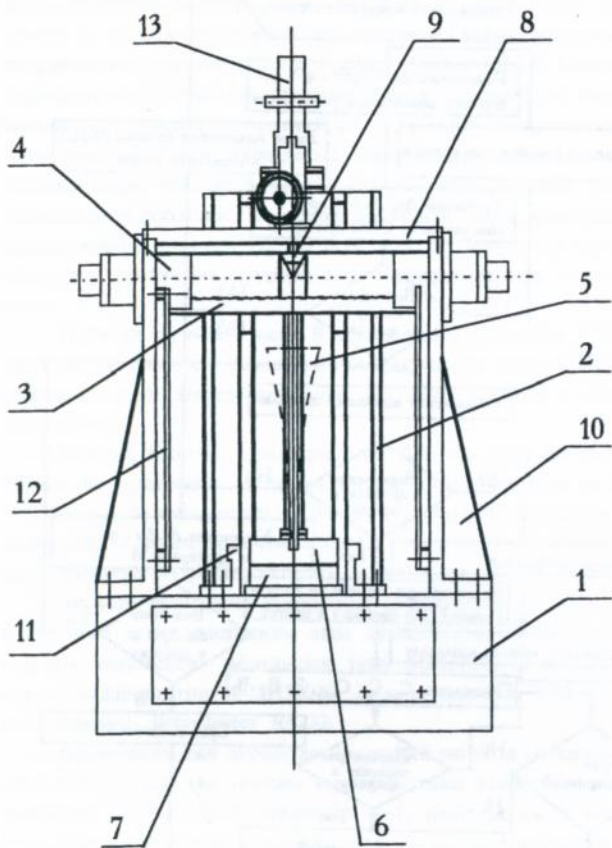


Рис.5. Схема вимірювальної машини

PCL-722 на 144 біти з організацією  $24 \times 6$  портів; кожний порт програмується на роботу в режимі вводу або виводу. Для вилучення впливу перешкод, що наводяться у лініях з'язку з ЧПУ та ВМ, застосовуються модулі оптоелектронної і релейної розв'язки.

Програмне забезпечення системи реалізує повністю автоматичний режим роботи системи контролю за окремими креслярськими перерізами, за довільними перерізами, лопатки в цілому, виведення результатів контролю на монітор з замиканням по поперізу або лопатці в цілому «Норма», «Брак непоправний», і «Брак поправний» з рекомендаціями про місця і товщину металу, який належить зняти. Результати остаточного контролю передаються також для друку, до бібліотеки ЕОМ і на ЕОМ верхнього рівня.

В результаті випробувань дослідного зразка системи з одним БДД і без повороту лопатки була одержана похибка контролю профілю порядок  $u \pm 6,2$  мкм, що відповідає розрахункам і дозволяє вважати, що система у повному обсязі забезпечить погрішність не більшу заданої  $\pm 15$  мкм.

В дисертації наведені також результати тривалого циклу робіт, направлених на розробку і впровадження технологічного оснащення для підвищення точності і продуктивності виготовлення складних деталей ГТД, а також універсального переналагоджувального контрольно-вимірювального оснащення.

Описані розроблені з урахуванням концепцій УПТО затискний патрон для закріплення тонкостінних деталей, ділильний поворотний пристрій, поворотний ділильний стіл, пристрій для фрезерування криволінійних пазів, пристрій для обробки відрізків з фасонною поверхнею, що періодично повторюються, на деталях типу тіла обертання, пристрою для обробки поверхонь хвостовика і бандажної полиці лопаток турбіни для шліфування поверхонь, що повторюються та ін. Всі пристосування істотно підвищують продуктивність виготовлення деталей складної форми.

Універсальне переналагоджувальне контрольно-вимірювальне оснащення складається з базової деталі і змінних налагоджень, що проєктуються на визначену деталь-операцію. Їх використання скорочує трудомісткість проєктування в 4—6 разів, а трудомісткість виготовлення у 6—10 разів у порівнянні зі спеціальним контрольним пристроєм. Найбільш успішно в АТ «Мотор Січ» вирішені питання створення і застосування переналагоджувального контрольно-вимірювального оснащення на такі деталі поверхні: еталони (міри) для настроювання пристроїв при контролі великих лінійних розмірів; контроль замка і

профілю лопаток; контроль биття, евольвенти і плями контакту шестерен; контроль перпендикулярності і паралельності; контроль діаметрів, биття радіальних і торцевих поверхонь корпусних деталей та ін.

Згадане технологічне оснащення широко впроваджене в цехах АТ «Мотор Січ»: більш 7 тис. базових пристроїв і майже 60 тис. налагоджень до них. Очікуване зниження трудозатрат від використання системи ВЕНТА оцінюється від 50 до 120 людиномісяців при обсязі виробництва порядку 6 тис. вентиляторних лопаток на рік.

На основі проведених теоретичних досліджень і впровадження технологічного оснащення і контрольно-вимірюваних пристроїв і систем дані рекомендації по розробці технологічних процесів виготовлення вентиляторних лопаток ГТД.

Нижче наведений частковий план обробки вентиляторних лопаток двигуна Д-18, у якому знайшли відображення результати роботи.

№№ оп.	Найменування операції	Вид оснащення або контрольно-вимірювальних пристроїв	Відображення результатів науково-дослідної роботи в техпроцесах
009	Фрезерно-центрувальна	Пристрій затискний	АС № 439350
037	Фрезерна	Пристрій поворотний	АС № 438519
050	Поздовжно-фрезерна	Пристрій	
065	Фрезерна	Пристрій на станок МА655А2	
070	Фрезерна	Пристрій на 4 <sup>х</sup> шпindelний горизонтально-фрезерний станок	
087	Фрезерна	Універсально-переналагоджувальний пристрій	
090	Фрезерна	Прилад для настроення інструмента	АС № 1221486
247	Шліфувальна		
285	Полірувальна	Пристрій для вимірювання геометричних параметрів деформованих виробів	Патент РФ № 920111584/28

### Висновки

1. Розроблена методика розрахунку точнісних характеристик обладнання для способу контролю геометричних параметрів деформова-

них виробів типу лопаток і лопастей.

2. Розроблена методика автоматизованої оцінки відповідності реального профілю технологічним вимогам.

3. Для забезпечення необхідної точності контролю профілю потрібно враховувати величину пружних деформацій лопатки під дією контактних сил з боку багатоканальних датчиків дотику і вносити відповідну поправку у випадку двохопорного закріплення лопатки у замку і технологічній бобишці.

При контролі геометрії повністю готової вентиляторної лопатки без технологічної бобишки, закріплюваної тільки в замку, необхідно використовувати розроблену схему побудови датчиків дотику з керованою нелінійною силовою характеристикою, що істотно зменшує контактний тиск багатоканального датчика дотику.

4. Дослідженнями основних характеристик БДД, що визначають точність знімання первинної інформації, встановлено, що розкид показань знаходиться в межах  $\pm (1 - 2)$  мкм при  $P = 0,95$ , а контактне зусилля при замірі профілю пера не перевищує 50 г незалежно від кількості щупів, які доторкнулись, що дозволяє контролювати консольно закріплені у замку готові вентиляторні лопатки без технологічної бобишки з введенням поправок на вигин тільки в крайніх перерізах лопатки.

5. На основі методу скінчених елементів з чотирьохвузовими ізопараметричними елементами розроблена методика розрахунку на ЕОМ по об'ємній математичній моделі пера лопатки її квадратної матриці податливостей перерізу, елементами якої є переміщення точок перерізу з координатами щупів під дією одиничної сили, що має координати щупів.

6. Введення даних в ЕОМ про координати поверхонь пера, вхідної і вихідної кромки повинне провадитись з використанням об'їгаючого опитування стану контактів щупів (замкнуто/розімкнуто) багатоканальних датчиків дотику.

7. Статистичне моделювання алгоритмів уписування ідеального профілю перерізу в реальні відліки показало, що оптимальним за швидкодією і правильності оцінки відповідності реального профілю технічним вимогам є спосіб, заснований на двоетапній процедурі: спочатку уписування за критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення, потім (у випадку негативного результату першого етапу) використання мінімаксного критерію до значень максимального відхилення профілю в тіло перерізу.

8. Розроблена конструкція власне вимірювальної машини спе-

ціалізованої системи контролю профілю пера вентиляторних лопаток, яка повністю відповідає вимогам, що пред'являються, по точності, швидкодії та зручності роботи, передбачає вертикальне розташування лопатки; застосування двох БДД, які підводяться до лопатки одночасно з різних сторін; поворот лопатки на оптимальний для кожного перерізу кут; переміщення обох БДД по вертикалі на траверсі; числове програмне управління механізмами; привід з використанням високомоментних двигунів постійного струму, передач ШПП та імпульсних датчиків кута повороту в ланцюгу зворотного зв'язку за положенням.

Розрахунок точності і швидкодії системи контролю в цехових умовах показує, що вони відповідають технологічним вимогам.

9. Розроблене і впроваджене в цехах АТ «Мотор Січ» універсальне переналаджувальне технологічне оснащення УПТО за тривалий час використання як на контрольні-вимірвальних операціях, так і при виготовленні деталей ГТД складної форми, зарекомендувало себе як ефективний засіб підвищення точності і продуктивності контролю і виготовлення складних деталей ГТД.

### Список основных публикаций по теме

1. А.С. № 325159 СССР. М. Кл. В 23г 17/04. Поворотный делительный стол /Н.П. Виноградов, В.А. Леховицер, Л.И. Шнитман, К.Д. Ламбак, Н.Ф. Химочко.—3 с.//Б.И.—1972. —№3.

2. А.С. № 379335 СССР. М. Кл. В 23с 3/28. Приспособление для фрезерования криволинейных пазов /В.А. Леховицер, Л.И. Шнитман, Н.Ф. Химочко. —3 с.//Б.И.—1973.—№20.

3. Шнитман Л.И., Баранов С.Е., Леховицер В.А. Применение перенастраиваемой контрольно-измерительной оснастки — резерв обеспечения стабильности качества выпускаемой продукции //Авиационная промышленность.—1973.—№10.—С.75—78.

4. А.С. № 438519 СССР. М. Кл. В 23г 17/02. Делительное поворотное устройство /В.А. Леховицер. —2с. //Б.И. —1974.—№29.

5. А.С. № 439350 СССР. М. Кл. В 23б 31/02. Зажимной патрон для закрепления тонкостенных деталей /А.Д. Зархин, В.А. Леховицер, Л.И. Шнитман, Г.О. Каланчук. —3с. //Б.И. —1974. —№30.

6. Леховицер В.А., Шнитман Л.И., Вах И.Г. Приспособление для обработки криволинейных пазов /Вестник машиностроения. — 1974. — №10. —С. 43—44.

7. Леховицер В.А., Шнитман Л.И. Обработка поверхностей хвостовика и бандажной полки лопаток турбины в многоместных приспособлениях /Авиационная промышленность. —1974. —№11. — С. 20—21.

8. А.С. № 657973 СССР. М. Кл. 2В 24В 17/02. Устройство для обработки периодически повторяющихся участков с фасонной поверхностью на деталях типа вращения /В.А. Леховицер, Н.Ф. Химочко, Л.И. Шнитман. —5с. //Б.И.—1979. —№15.

9. А.С. № 837785 СССР. М. Кл. К В 24 В 17/02. Устройство для шлифования повторяющихся фасонных поверхностей /В.С. Танкилевич, В.А. Леховицер, Л.И. Шнитман. —5с. //Б.И. —1981. №22.

10. А.С. № 1221486 СССР. М. Кл. 4G 01 В 9/04. Устройство для измерения радиуса и угла сопряжения поверхностей деталей / В.С. Танкилевич, В.А. Леховицер, Л.И. Шнитман. —4с. //Б.И. —1986. —№12.

11. А.С. № 1466914 СССР. М. Кл. В 24 В 39/02. Устройство для обработки внутренних торцевых поверхностей корпусных деталей /В.Ф. Пригченко, В.К. Яценко, Л.С. Рывкин, В.А. Леховицер. —4с. //Б.И. — 1989. —№11.

12. Комплексная автоматизация технологической подготовки производства /В.А. Богуслаев, В.А. Леховицер, В.Ф. Сорокин, Ф.Ш. Константиновский, И.Г. Ромашко /Новые технологические процессы и надежность ГТД //Под ред. проф. Биргера И.А. —М: Изд-во ЦИАМ, 1991. —С. 3—33.

13. Исследование деформации лопаток ГТД при точечном нагружении шуповыми датчиками контроля геометрии /Г.М. Гавеля, И.П. Железко, В.А. Леховицер, В.Я. Ободан. /Динамика и прочность машин и конструкций //Под ред. акад. В.И. Моссаковского. — Дн-ск.: Изд-во ДГУ, 1993. —С. 37—45.

14. Устройство для измерения геометрических параметров деформируемых изделий /В.Я. Ободан, В.А. Богуслаев, В.А. Леховицер, Е.А. Бердянский, Е.Р. Липский, А.В. Лысенко //3-ка на выдачу патента РФ № 92011584/28 от 09.12.92. — Решение о выдаче патента от 25.06.93.

15. Богуслаев В.А., Леховицер В.А., Ободан В.Я. Основные принципы построения специализированных КИМ контроля геометрии лопастей энергомашин /Проблемы динамики и прочности электро- и энергомашин. Всероссийский научный семинар //Под ред. проф. Фридмана В.М. — СПб.: Ин-т проблем машиноведения РАН, 1993. — С. 55.

16. Богуслаев В.А., Леховицер В.А., Ободан В.Я., Бердянский Е.А. Многоканальный датчик касания для контроля геометрии вентиляторных лопаток авиадвигателей /Датчики электрических и неэлектрических величин. Труды 2-й Международной конференции. — Барнаул: Росийская инженерная академия, 1995. —С. 46—47.

### **Аннотация**

Леховицер В.А. Исследование и разработка технологии контроля геометрии вентиляторных лопаток ГТД с учетом упругих деформаций при измерении.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.04 — технология производства летательных аппаратов, Харьковский авиационный институт, Харьков, 1996 г.

В работе представлены аналитические и экспериментальные исследования методов контроля геометрии вентиляторных лопаток, разработана деформационная модель вентиляторной лопатки, разработан метод многоканального измерения криволинейных поверхностей пера лопатки, рассматриваемой как упругое тело и способ вписывания идеального профиля в реальный. Разработаны принципы создания переналаживаемой контрольно-измерительной оснастки для контроля геометрии сложных деталей.

Осуществлено промышленное внедрение в производство новых средств контроля геометрии лопаток.

### **Abstract**

Victor A. Lekhovitser. Investigation and development of geometry inspection procedure of gas-turbine engine fan blades taking into consideration elastic deformation during measurement.

Competition for doctoral thesis for doctor of technical sciences degree in speciality 05.07.04 — aircraft production engineering, Kharkov Aeronautical Institute, Kharkov, 1996.

Analytical and experimental methods for fan blade geometry inspection have been represented, the fan blade deformation model has been developed, the procedure for multichannel measurement of curvilinear blade aerofoil surface has been developed and in so doing the blade is considered as an elastic body and the method of inscribing the ideal profile into the real one is also expounded.

New facilities for blade geometry inspection have been adopted in industry.

### **Ключевые слова**

Технологический процесс, вентиляторная лопатка ГТД, контрольно-измерительное оборудование, проектирование, технологическая оснастка.













АВ 35.656

Підписано до друку 26.07.96.

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір Xerox Paper. Гарнітура TimesET.

Видавнича система Renk Xerox DocuTech.

Ум. друк. арк. 1,49. Обл.-вид. арк. 1,66. Тираж 80 прим. Заказ № 2

Харківський авіаційний інститут  
330071, Харків, вул. Чкалова, 17.

Оригінал-макет підготовлено в АТ «Мотор Січ».

---

Друкарня Запорізького АТ «Мотор Січ»,  
330068, Запоріжжя, вул. 8 Березня, 15.