

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Сидоренко Ганна Юріївна

УДК 621.7.015:681.5.015.42-7.054.2

**СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ  
ЯКІСТЮ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ  
НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ  
ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ**

Спеціальність 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі “Системний аналіз та управління” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Мазманішвілі Олександр Сергійович**,  
Національний технічний університет “Харківський  
політехнічний інститут”, професор кафедри  
системного аналізу та управління.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Любчик Леонід Михайлович**,  
Національний технічний університет “Харківський  
політехнічний інститут”, завідувач кафедри  
комп’ютерної математики і математичного  
моделювання

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Суздаль Віктор Семенович**,  
Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України,  
м. Харків, старший науковий співробітник відділу № 2  
технології вирощування монокристалів.

Провідна установа: Науково-виробнича корпорація  
“Київський інститут автоматики”  
Міністерства промислової політики України, м. Київ.

Захист відбудеться “14” \_\_\_\_\_ червня \_\_\_\_\_ 2007 р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07 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” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий “12” \_\_\_\_\_ травня \_\_\_\_\_ 2007 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.07

І.П. Гамаюн.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Оптичні полімерні вироби знайшли широке застосування у багатьох галузях промислового виробництва, а також в наукових дослідженнях. Однією з основних проблем під час виробництва виробів із оптичних полімерних матеріалів необхідно вважати проблему забезпечення високої якості обробки поверхонь.

Сьогодні якість поверхневого шару оцінюється комплексом параметрів, які характеризують мікронерівність поверхневого матеріалу. Вимоги до якості готової продукції, що сформульовані в стандартах серії ISO 9000, диктують нові показники, які пропонувані до контрольних операцій технологічної обробки поверхонь. Це обумовлено тим, що найважливіші експлуатаційні властивості оптичних виробів залежать не тільки від висот нерівностей, але й від їх форми й кроків. Нормування цих показників не передбачено діючими стандартами. Таким чином, виникає необхідність розробки й обґрунтування методів і критеріїв оцінки якості поверхневого шару на основі статистичних оцінок параметрів мікронерівностей.

Впровадження у виробництво нових критеріїв оцінки якості опрацьованих поверхонь визначає відповідні зміни в системі автоматизованого управління якістю, які ґрунтуються на новому математичному та алгоритмічному забезпеченні. В свою чергу, розробка й обґрунтування статистичних критеріїв, методів і алгоритмів їх оцінювання в процесі обробки виробів передбачають створення відповідних математичних моделей, які описують шорсткість поверхонь із заданими статистичними показниками.

Таким чином, розробка вискоєфективного критерію автоматичного управління якістю механічної обробки оптичних полімерних виробів на основі статистичного оцінювання параметрів шорсткості є необхідною в сучасному технологічному виробництві, що й обумовлює **актуальність** теми дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі системного аналізу й управління в співробітництві з кафедрою інтегрованих технологій машинобудування НТУ “ХПІ” відповідно до планів науково-дослідних робіт в рамках держбюджетної теми “Створення концепції управління і забезпечення якості прецизійних сцинтиляційних оптичних виробів на основі системного підходу” (ДР № 0104U003014, план НДР МОН України), де здобувач брав участь як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка математичного й алгоритмічного забезпечення сучасних інформаційних технологій для оцінки й управління стану поверхневого шару оптичних полімерних виробів. Відповідно до зазначеної мети в роботі були поставлені та вирішені наступні задачі:

– дослідження технологій, що використовувалися для оцінювання й контролю якості поверхневого шару оптичних полімерних виробів;

- створення методики технології автоматизованого контролю якості оптичних виробів в умовах серійного виробництва на основі теорії стохастичних процесів;
- дослідження стійкості отриманих експериментальних даних щодо похибок у технології обробки оптичних полімерних виробів в умовах серійного виробництва;
- повний статистичний опис властивостей дискретного квадратичного функціоналу, заснованого на розв'язанні стохастичних диференціальних рівнянь із сталими коефіцієнтами;
- одержання точного й наближеного розподілів ймовірностей для обраного функціонала якості, а також створення алгоритмів розрахунку законів розподілу й заснованих на них правобічних граничних значень;
- побудова правил прийняття рішень, які ґрунтуються на порівнянні спостережених даних і статистичних порогів, які призначені для автоматичного управління якістю опрацьованої оптичної поверхні;
- чисельне моделювання випадкових процесів і критерію якості, який базується на цих процесах, з метою перевірки побудованих алгоритмів управління якістю опрацьованої оптичної поверхні.

*Об'єкт дослідження* – процес механічної обробки оптичних полімерів в умовах серійного виробництва.

*Предмет дослідження* – методи оцінювання системи параметрів шорсткості випадкових процесів і засновані на них технології оцінки, управління й контролю якості стану поверхневого шару оптичних полімерних виробів після технологічної обробки.

*Методи дослідження.* При розв'язанні задач роботи застосовувались методи теорії прийняття рішень для управління станом якості поверхневого шару оптичних полімерів, теорії ймовірностей і математичної статистики для повного статистичного опису використовуваного критерію, а також чисельні методи прикладного аналізу для обчислення кількісних характеристик шорсткості опрацьованої поверхні.

Експериментальні дослідження мікрогеометрії поверхні і оцінка точності полістирольних виробів після фрезерування базуються на теорії ймовірностей й математичної статистики.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- дістав подальшого розвитку комплексний підхід, що базується на теорії стохастичних процесів, контролю й оцінки мікрогеометрії опрацьованих поверхонь, який забезпечує ефективну оцінку якості оптичних поверхонь;
- вперше запропоновано розширений комплекс фізико-математичних і технологічних параметрів, який зв'язує мікрогеометрію й поверхневий шар механічно опрацьованих поверхонь із функціональними властивостями оптичних полімерних виробів, що дозволило скоротити затрачений ресурс для досягнення необхідного рівня якості поверхні;
- удосконалена статистична методика управління якістю поверхневого шару оптичних виробів, на основі якої досліджені властивості густини розподі-

лу ймовірностей дискретного квадратичного критерію якості управління технологічним процесом обробки оптичних поверхонь;

– удосконалена методика знаходження гранично припустимого значення (квантилю) для використання як критерію автоматичного управління якістю оптичної поверхні, що дозволило обґрунтовано дослідити технологічний процес обробки оптичних поверхонь.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

– створено інженерну методику і критерій контролю й аналізу стану якості поверхневого шару оптичних виробів для серійного виробництва;

– запропоновано методику контролю й оцінки якості механічно опрацьованої поверхні, що базується на теоретико-ймовірнісному підході, який гарантує ефективну оцінку якості поверхонь оптичних виробів на виробництві;

– отримано емпіричні залежності розподілу адитивного квадратичного функціонала і правобічних квантилів від параметрів шорсткості поверхні для вирішення практичної задачі управління процесом механічної обробки оптичних поверхонь.

Результати проведених досліджень реалізовані при виробництві плоских полістирольних виробів “Tile” для будівництва адронного калориметру CMS (CERN, Швейцарія): в ТОВ ВПП “Амкріс-Пласт” (м. Харків) і в інституті “УкрНДІспецсталь” (м. Запоріжжя). Результати дисертаційної роботи використані у лабораторному практикуму навчального процесу кафедри системного аналізу та управління НТУ “ХПІ” при викладанні дисциплін “Теорія ймовірностей та математична статистика” та “Чисельні методи”.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. У роботах, що виконані у співавторстві, здобувачем обґрунтовано застосування теоретико-ймовірнісного підходу при прийнятті рішень про якість поверхневого шару оптичних виробів, запропонована методика автоматичного управління якістю опрацьованої оптичної поверхні, розглянуто вплив параметрів шорсткості на якість опрацьованої поверхні, представлено статистичний опис властивостей дискретного квадратичного критерію якості при технологічній обробці оптичних поверхонь, запропоновано алгоритм аналізу й контролю якості опрацьованих оптичних полімерів, обґрунтовано вибір оптимального обсягу вимірювальної вибірки профілограм опрацьованих поверхонь, проаналізовано параметри шорсткості при моделюванні технологічного процесу обробки оптичних полімерів, розглянуто вплив вихідних властивостей оптичного полімерного матеріалу на якість поверхневого шару, отримана залежність ефективної кількості обсягу вимірювань від коефіцієнта кореляції, запропоновано підхід щодо оптимізації контролю параметрів шорсткості опрацьованих оптичних поверхонь, розглянуто вплив корельованих послідовностей у задачах статистичного оцінювання, проаналізовано вплив алгоритму контролю якості параметрів шорсткості опрацьованих оптичних полімерів на погрішності при механічній обробці, удосконалено підхід щодо вибору положення системи координат для дослідження профілограм поверхневого шару оптичних виробів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наступних наукових конференціях: 10-й, 11-й, 12-й та 13-й Міжнародних конференціях з автоматичного управління “Автоматика” (м. Севастополь, 2003 р., м. Київ, 2004 р., м. Харків, 2005 р., м. Вінниця, 2006 р.); 11-й та 12-й Міжнародних наукових конференціях “Інформаційні технології” (м. Харків, 2003 р., 2004 р.); III конференції з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (м. Харків, 2005 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології” (м. Чернівці, 2006 р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 15 робіт, з них 7 статей у фахових виданнях ВАК України.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації складає 150 сторінок. Робота містить 49 рисунків за текстом, 7 таблиць за текстом, 3 додатки на 15 сторінках, 112 найменувань використаних літературних джерел на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми дослідження, сформульовано мету та визначені основні задачі роботи, зазначено об’єкт, предмет і методи дослідження, описано характеристику наукової новизни і практичної значущості отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача у роботі, наведено відомості про апробацію та публікації основних результатів роботи.

**У першому розділі** проведено аналіз питань, пов’язаних з управлінням технологічного процесу обробки оптичних полімерів, виділені структурні елементи технологічного об’єкта управління й розглянуті режими його функціонування. Зазначено причини практичної необхідності вдосконалення реалізованих алгоритмів управління з метою підвищення якості поверхні. Проаналізовано сучасні тенденції розробки й модернізації системи управління якістю оптичних поверхонь, розглянуто проблеми, що обумовлюють необхідність модернізації й удосконалення системи управління та оптимізації контролю шорсткості поверхні оптичних виробів. Виділено основні проблеми розглянутого технологічного об’єкта управління, а саме, управління контролем якості поверхневого шару оптичних полімерів, розглянуто принципи його функціонування. Обґрунтовано необхідність побудови системи критеріїв і прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних виробів.

Застосовано теоретико-ймовірнісний та статистичний апарат для дослідження профілограм поверхонь. Проаналізовано профілограми поверхонь ОВ, отриманих шляхом фрезерування. Показано, що ці поверхні добре інтерпретуються як реалізації випадкового поля, а їх перетини – як реалізація випадкового процесу з нормальним розподілом амплітуд. У використовуваних моделях параметри шорсткості поверхні будуть функціоналами, заданими на множині ре-

лізацій випадкової функції. Зазначено, що технологія механічної обробки поверхні припускає управління цим процесом, який здійснюється на основі кількісних критеріїв якості опрацьованої поверхні. Показано, що на основі обробки випадкових значень функціонала якості методами математичної статистики будеться відповідна теорія прийняття рішень.

Розроблено алгоритм контролю й аналізу мікрогеометрії оптичних виробів на основі теорії випадкових процесів для реалізації завдання оцінки якості опрацьованої поверхні (рис. 1).

Виконано огляд методів побудови системи управління технологічним процесом обробки оптичних поверхонь. Показано, що основні труднощі, що перешкоджають безпосередньому застосуванню класичних методів управління якістю опрацьованої оптичної поверхні, є багатовимірний характер об'єктів управління й властивість їх мінімальної дефектності. Проаналізовано проблеми, що виникають у зазначених випадках.

Обрано математичну модель, що описує профілограми та на практиці відповідає параметрам шорсткості оброблених оптичних полімерів

$$J_h = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n^2, \quad (1)$$

де  $h_n = h(n\Delta)$  – дискретна послідовність відліків;  $n$  – номер елемента вибірки ( $n=1, 2, \dots, N$ );  $N$  – кількість елементів у вибірці;  $\Delta$  – крок вимірів (мкм),  $\Delta = L/N$ ;  $L$  – довжина інтервалу спостережень (мкм).

Зазначено, що теоретичною основою для рішення завдань управління й прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних полімерів може служити теорія стохастичних процесів, і обґрунтована необхідність надалі розвитку й модернізації цього методу. Дано загальну характеристику й проаналізовані особливості запропонованого підходу до розв'язування завдань синтезу управління якістю з позицій аналітичного конструювання й автоматизованого проектування систем управління.

Показана необхідність застосування методів теорії ймовірностей і математичної статистики на основі аналізу й математичної обробки експериментальних даних, отриманих з профілограм. Зазначено, що на практиці в завданнях, де справу мають із випадковим явищем з невідомою ймовірнісною структурою, висновки про яку потрібно винести за експериментальним матеріалом, розглядаються не самі параметри, а їх оцінки, отримані на підставі вибірки дослідних даних. Показано, що на основі цих оцінок робляться висновки про істинні значення параметрів.

Наведено обґрунтування вибору мети дисертаційної роботи й сформульовані основні завдання дослідження.

**Другий розділ** присвячений розв'язанню задачі синтезу автоматизованої системи управління якістю поверхонь оптичних полімерів на основі застосування й розвитку теорії випадкових процесів і квадратичних функціоналів та теорії оцінювання й прийняття рішень.

Показано, що емпіричні дані добре узгоджуються з нормальним законом розподілу, тому модель профілограм, опрацьованих різанням оптичних полімерних поверхонь, можна вважати прийнятною у вигляді реалізації нормального випадкового процесу.

Визначено, що отримані в результаті запропонованої схеми правобічні граничні значення характеризують мікрогеометрію опрацьованої різанням оптичної полімерної поверхні. Вони враховують особливості положення й форми нерівностей та їх можна рекомендувати у використанні як критерію автоматичного управління якістю оптичної поверхні. Наведено математичний опис структурних елементів і отримана математична модель об'єкта управління.

Отримано та проаналізовано умови вибору положення системи координат. Знайдені оцінки положення вісі координат і параметрів шорсткості є достатніми, що показує прийнятність використання даного методу для визначення початку відліку й положення вісі стаціонарності в рамках використання профілограм оптичних поверхонь.

Запропоновано методикау знаходження гранично припустимого значення (квантилю) для використання як критерій автоматичного управління якістю оптичної поверхні після механічної обробки.

Зазначено, що для знаходження правобічних квантилів  $\eta_\alpha$  треба розв'язати задачу повного статистичного опису обраної математичної моделі (1). Для вирішення задачі необхідно представити густину розподілу функціонала якості (1). Запропоновано для розв'язання цієї задачі 2 підходи: 1-й – за допомогою твірної функції розподілу, 2-й – через наближену формулу густини.

Отримано наближену формулу твірної функції для дискретного квадратичного критерію якості, з використанням методів математичного аналізу й випадкових процесів

$$Q_{J_h}(\lambda) = \left( \frac{pR}{(a_1 - q^2)^2 a_1^{N-1} - (a_2 - q^2)^2 a_2^{N-1}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

Показано, що при відсутності кореляції ( $q \rightarrow 0$ ) густина розподілу ймовірностей розглянутого критерію якості (1) добре узгоджуються з  $\chi^2$ -розподілом із кількістю ступенів вільності  $N - 1$ .

На основі побудованих методів отримана наближена формула густини розподілу ймовірності даного функціонала якості (1) для використання в рамках серійного виробництва оптичних полімерів.

Використовуваний у даній роботі дискретний квадратичний критерій якості (1) можна привести до інтегрального квадратичного виду (при  $N \rightarrow \infty$ )

$$J_h = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n^2 = \frac{1}{L} \Delta \sum_{n=1}^N h_n^2 \Rightarrow \frac{1}{L} \int_0^L h^2(l) dl, \quad (3)$$

де  $\Delta = L/N$ .



Для обраної математичної моделі була отримана наближена формула густини розподілу ймовірностей інтегрального квадратичного функціоналу (3)

$$f(\eta) = \sqrt{\frac{vL\eta_c}{\pi\eta^3}} \left[ \frac{\eta_c\eta}{(\eta + \eta_c)^2 - (\eta - \eta_c)^2 \exp(-2vL\eta_c/\eta)} \right]^{\frac{1}{2}} \exp\left[ -\frac{vL}{4} \left( \sqrt{\frac{\eta}{\eta_c}} - \sqrt{\frac{\eta_c}{\eta}} \right)^2 \right], \quad (4)$$

де середнє  $\eta_c = \langle J_h \rangle$  дорівнює  $\sigma_h$ . Останній множник в (4) визначає вираз для густини, тому отримаємо

$$f_{J_h}(\eta) = \sqrt{\frac{vL\eta_c}{4\pi\eta^3}} \exp\left[ -\frac{vL}{4} \left( \sqrt{\frac{\eta}{\eta_c}} - \sqrt{\frac{\eta_c}{\eta}} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Густина розподілу (5) є нормованою на одиницю в області визначення, тобто

$$\int_0^{\infty} f_{J_h}(\eta) d\eta = 1, \quad (6)$$

має один максимум і наступну асимптотику в периферійній області ( $\eta \gg \eta_c$ ) великих відхилень

$$f_{J_h}(\eta) = \sqrt{\frac{vL\eta_c}{4\pi\eta^3}} \exp\left( -\frac{vL\eta}{4\eta_c} \right). \quad (7)$$

Формула для знаходження правобічного квантилю квадратичного критерію якості має вигляд

$$\alpha = \int_{\eta_\alpha}^{\infty} f_{J_h}(\eta) d\eta = \sqrt{\frac{4}{\pi vL}} \exp\left( -\frac{vL\eta_\alpha}{4\eta_c} \right). \quad (8)$$

Із рівняння (8) отримано формулу правобічного квантилю, яка придатна для оцінки мікрогеометрії оптичних полімерів в умовах серійного виробництва.

$$\eta_c = \frac{vL}{4} \eta_\alpha \ln\left( \alpha \sqrt{\frac{\pi vL}{4}} \right). \quad (9)$$

Розглянуто методику управління й прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних полімерних виробів у випадку, коли застосовується узагальнений стаціонарний гаусівський стохастичний процес «сигнал плюс шум». Даний функціонал має вигляд

$$J_{h+s} = \sum_{n=1}^N [s_n + h_n]^2, \quad (10)$$

де  $s_n = s(n\Delta)$  – відлік сигнального процесу,  $h_n = h(n\Delta)$  – відлік шумового процесу.

Для розв'язання задачі про статистику функціоналу (10) був використаний метод, який оснований на обчисленні твірної функції  $Q_{J_{h+s}}(\lambda)$

$$Q_{J_{h+s}}(\lambda) = Q_{J_h}(\lambda) Q_{J_s}(\lambda) Q_{J_{hs}}(\lambda), \quad (11)$$

**У третьому розділі** здійснено імітаційне моделювання процесу механічної обробки оптичних полімерів, за допомогою якого показаний вплив параметрів шорсткості опрацьованих виробів на оцінку якості поверхневого шару на всіх стадіях обробки поверхонь. Як імітаційна модель профілограми був обраний випадковий марківський процес чи процес Орнштейна-Уленбека (ОУ-процес), який описується рівнянням

$$\frac{d}{dl} h(l) + \nu h(l) = u(l), \quad (12)$$

де  $u(l)$  – процес «білого шуму»,  $\nu$  – декремент.

Якраз стохастичні властивості “білого шуму” забезпечують марковість ОУ-процесу. Отримано вирази для показників точності регулювання при статистичному й нестатистичному завданні апріорної інформації.

Отримано оцінки точності параметрів шорсткості оптичних поверхонь при обраних значеннях параметрів шорсткості технологічного процесу: дисперсії  $\hat{\sigma}_h^2$ , декременту згасання  $\hat{\nu}$  (для його визначення використовується методика, заснована на кореляційному аналізі), правобічного квантилю  $\eta_\alpha$ .

Побудовані 95%-і довірчі інтервали для параметрів шорсткості оптичної поверхні. Показано тенденцію розвитку ширини довірчого інтервалу зі збільшенням обсягу експериментальної вибірки.

Виконано аналіз динаміки поведінки правобічного квантилю при наявності погрешностей, що виникають у процесі технологічної обробки оптичних поверхонь. На підставі алгоритмів керування процесом механічної обробки запропоновані оптимізаційні процедури, що забезпечують економію виробничих ресурсів.

**Четвертий розділ** присвячений розгляду особливості застосування розробленої методики контролю якості шорсткості полімерних матеріалів для рішення практичного завдання автоматизованого управління процесом механічної обробки оптичних поверхонь.

Обґрунтовано доцільність використання даної методики контролю якості шорсткої поверхні при механічній обробці виробів. Наведено статистичне обґрунтування процедури управління механічною обробкою, за допомогою якої можливе одержання виробів, що мають високі експлуатаційні показники, а також завдяки якій можливо вчасно вносити корективи в технологічний процес обробки.

Розроблено обчислювальну процедуру й програмне забезпечення для вирішення завдання контролю якістю оптичних полімерів на основі запропонованої методики із застосуванням сучасних програмних засобів автоматизації процесу керування обробкою. Розроблено методику оцінки якості вихідної структури полімерного оптичного матеріалу, що базується на теорії стохастичних процесів. Дана методика дозволяє при мінімальних фінансових і тимчасових витра-

тах прогнозувати одержання оптичного виробу після лезвійної обробки з необхідними вимогами по шорсткості й довгостроковій стабільності. Встановлено, що величина гранично припустимого граничного значення (квантилю) характеризує вихідну структуру оптичного полімерного матеріалу, при якій можливе одержання виробу з необхідними експлуатаційними властивостями.

Для перевірки роботи запропонованого алгоритму автоматичного управління якості поверхні в даній роботі були обчислені параметри шорсткості  $\nu$  й  $\sigma_h^2$ , побудовані відповідні густини розподілу ймовірностей і знайдені правобічні граничні значення, які в цьому випадку служать критерієм шорсткості. Для наочності із множини опрацьованих оптичних полімерів були обрані випадковим чином 10 зразків, для яких результати обчислень наведені в Таблиці 1.

На рис. 2 наведено приклади густин розподілу ймовірностей для зразків № 1, 4, 6, 9, 10. На рис. 3 наведені функції розподілу для відповідних зразків.

Із рис. 2 і рис. 3 можна зробити висновок про те, що використовуваний критерій прийнятний для оцінювання якості поверхневого шару оптичних виробів, тому що чим більше значення правобічного квантилю  $\eta$ , тим якість поверхні гірше, що й доводять рисунки.

Рівень значущості  $\alpha$  являє собою відсоток кількості браку, що допускається нормативно на виробництві. Величина  $\eta_\alpha$  характеризує опрацьовану поверхню оптичного полімерного виробу з гранично припустимим коефіцієнтом внутрішнього відбиття  $R_2 = 0,80$  від. од. та гранично припустимою якістю опрацьованої поверхні полімерних оптичних виробів.

Удосконалена методика, в основі якої лежить комплексний підхід до проблеми контролю та оцінки мікрогеометрії оброблених поверхонь. Цей підхід пов'язує технологічні ( $R_a$ ,  $R_z$ ), фізичні ( $\nu$ ,  $R_2$ ) і математичні ( $\sigma_h^2$ ,  $\eta$ ) параметри. Він запропонований для оцінки мікрогеометрії оптичних поверхонь в умовах виробництва.

На основі одержаних результатів встановлено зв'язок параметра шорсткості  $R_a$ , коефіцієнта внутрішнього відбиття  $R_2$  і критерію якості  $\eta$ . На рис. 4 представлені результати оцінки якості поверхні полімерних оптичних виробів, отриманих за допомогою розробленої методики.

Так, з десяти досліджених полімерних зразків із Табл.1, що мають шорсткість поверхні  $R_a = 0.06 \div 0.065$  мкм, три зразки характеризуються критерієм якості  $\eta_\alpha$ , значення якого перевищує  $\eta$ . Цим зразкам відповідають крапки, які знаходяться нижче рівня, який гарантує високу якість опрацьованої поверхні оптичних полімерних виробів. Визначено, що великим значенням  $\eta$  відповідають менші значення  $R_2$ , тобто зростання значень квантиля характеризується зниженням коефіцієнта внутрішнього відбиття.

Наведено результати розв'язання задачі контролю й аналізу управління якістю ОП на основі реалізації запропонованої в роботі методики. Проаналізовано вплив параметрів шорсткості ( $\sigma_h^2$ ,  $\nu$ ) на якість поверхневого шару після механічної обробки.

Розроблено структурну схему методики управління якістю технологічного процесу обробки поверхні (рис. 5).

Показано, що в технологічному процесі обробки необхідним є аналіз визначення достатнього обсягу обмірюваної вибірки профілограми оброблених оптичних поверхонь, а також вплив неповної вибірки експериментальних даних на результат контролю якості оброблених оптичних поверхонь, тому що на виробництві виникає проблема отримання та обробки експериментальних даних великої кількості.

На основі теоретичних положень були отримані оцінки коефіцієнтів кореляції, побудовані кореляційні функції і наведені оцінки декременту згасання  $\hat{\nu}$  для всіх заданих  $N$ .

На рис. 6 представлена залежність оцінки декременту згасання  $\hat{\nu}$  від обсягу  $N$  вимірювальної вибірки. Аналіз залежності показав, що зі збільшенням обсягу вибірки оцінка декременту  $\hat{\nu}$  прямує до свого ідеального значення.

Показано, що запропонована методика оцінки якості вихідної структури полімерного оптичного матеріалу, яка базується на теорії стохастичних процесів, дозволяє при мінімальних фінансових і часових затратах прогнозувати отримання оптичного виробу після лезвійної обробки з необхідними вимогами до шорсткості та довготривалої стабільності.

**У Додатках** наведено опис вибору інструментального матеріалу та приладів для обробки оптичних поверхонь, таблиці правобічних квантилів для різних параметрів шорсткості, які застосовуються як критерій якості технологічного процесу обробки оптичних поверхонь. У Додатку 3 приведені акти впровадження та апробації результатів роботи, а також довідка про використання в навчальному процесі на кафедрі системного аналізу та управління НТУ “ХПІ”.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної задачі синтезу автоматизованої системи управління якістю механічної обробки оптичних поверхонь на основі статистичної оцінки параметрів шорсткості. Основний результат роботи полягає в розробці та обґрунтуванні методики побудови критерію для прийняття рішення про якість поверхневого шару і його застосуванні для рішення завдань аналізу й контролю шорсткості опрацьованої оптичної поверхні.

У процесі виконання роботи отримано наступні основні результати:

1. Показано, що застосування класичних методів контролю й аналізу якості опрацьованої поверхні оптичних виробів механічним шляхом є недостатнім, оскільки об'єкти управління носять багатовимірний характер.
2. Побудовано математичні моделі формування якості поверхонь, засновані на розв'язанні стохастичних диференціальних рівнянь із сталими коефіцієнтами, а також адитивних квадратичних функціоналів.
3. На основі теоретико-ймовірнісного підходу при опису шорстких поверхонь оптичних виробів отримані вирази точного й наближеного

розподілів ймовірностей для дискретного квадратичного критерію якості. Показано можливість контролю якості оптичної поверхні у випадку присутності шумового компоненту профілю, а також оптимізації процесу управління якістю поверхневого шару й ухвалення правильного рішення про його стан.

4. Показано, що теоретичною основою для вирішення завдань управління й прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних полімерів може служити теорія стохастичних процесів. Проаналізовано методику управління й прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних полімерних виробів у випадку, коли застосовується узагальнений стаціонарний гаусівський стохастичний процес «сигнал плюс шум».

5. Розроблено методику контролю та ефективної оцінки якості поверхні оптичних полімерних виробів, яка дозволяє комплексно оцінити мікрогеометричний профіль поверхні оптичних виробів з погляду їх функціонального призначення.

6. Побудована ієрархія прийняття рішень, які ґрунтуються на порівнянні спостережених даних і статистичних порогів та яка склала основу для створення системи управління якістю опрацьованої оптичної поверхні.

7. Показана ефективність застосування розробленої методики контролю якості поверхні оптичних полімерних виробів, яку підтверджують результати дисертаційної роботи, надійність яких обумовлена аналізом параметрів мікропрофілю поверхні, що мають вплив на функціональні властивості оптичних виробів і надійністю математичної моделі їх взаємодії. Запропонована методика може бути використана для оцінки мікрогеометрії оптичних поверхонь в умовах серійного виробництва.

8. Розроблено алгоритмічне й програмне забезпечення, що дозволяє обчислити правобічні граничні значення для дискретного квадратичного критерію якості, який використовується як критерій прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних виробів.

9. Розроблені принципи чисельного моделювання випадкових процесів і критерію якості, який базується на цих процесах, з метою перевірки побудованих алгоритмів управління якістю опрацьованої оптичної поверхні

10. Проаналізовано вплив параметрів шорсткості оброблених виробів на оцінку якості поверхневого шару на всіх стадіях обробки поверхонь (починаючи з чорнової до чистової обробки виробу), на основі проведеного імітаційного моделювання технологічного процесу.

11. Розроблені методи використані в процесі проведення робіт з удосконалення систем управління процесом механічної обробки оптичних поверхонь, що дозволило забезпечити підвищення якості поверхневого шару плоских сцинтиляційних виробів “Tile”. Отримані результати роботи впроваджені на ТОВ ВПП “Амкріс-Пласт”, а також у навчальному процесі на кафедрі системного аналізу та управління НТУ “ХПІ”.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Везуб Н. В., Чернышов А. А., Литвиненко М. В., Сидоренко А.Ю. Алгоритм управления и контроля микрогеометрии оптических полимеров // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. – Т. 11., Вып. 9. – С. 108-112.

Здобувачем запропонована методика автоматичного управління якості поверхні оптичних полімерних виробів, що дозволяє комплексно оцінити мікрогеометричний профіль поверхні оптичних виробів з погляду їхнього функціонального призначення.

2. Сидоренко А.Ю. Статистический подход при управлении качеством поверхностного слоя в процессе технологической обработки изделий // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2003. – Т. 1., № 6. – С. 29-32.

3. Мазманишвили А.С., Сидоренко А.Ю. Статистическое описание многоточечного квадратичного критерия качества при технологической обработке оптических поверхностей // Механіка і машинобудування. – Харків. – 2004. – № 1. – С. 240-245.

Здобувачем був представлений статистичний опис багатоточкового квадратичного критерію якості при технологічній обробці ОП.

4. Сидоренко А.Ю., Мазманишвили А.С. Выбор оптимального объема измеренной выборки профилограмм обработанных поверхностей // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 45. – С. 137-141.

Здобувачем обґрунтовано вибір оптимального обсягу обмірюваної вибірки профилограм опрацьованих ОП шляхом чисельного моделювання.

5. Сидоренко А.Ю. Влияние параметров шероховатости на качество поверхностного слоя // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 36. – С. 85-91.

6. Сидоренко А.Ю., Чернышев А.А. Влияние исходных свойств оптического полимерного материала на качество поверхностного слоя // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – №59. – С. 79-86.

Здобувачем розглянуто вплив вихідних властивостей оптичного полімерного матеріалу на якість поверхневого шару.

7. Сидоренко А.Ю., Мазманишвили А.С., Старушкин Д.А. Дискретный квадратичный функционал качества и эффективное количество его компонент // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. - Харків: НТУ “ХПІ”. – 2006. – №45. – С. 31-36.

Здобувачем розглянуто метод контролю якості випадкових процесів із застосуванням дискретного квадратичного функціоналу. Отримана залежність ефективної кількості підрахунків адитивного критерію, тобто обсягу вимірювань, від коефіцієнта кореляції.

8. Сидоренко А.Ю., Мазманишвили А.С. Методология синтеза управляющих правил при технологическом процессе обработки поверхностей // Анотації доповідей міжнародної науково-практичної конференції “MicroCAD-System”. – Харків: НТУ “ХП”. – 2003. – С. 32.

Здобувачем запропоновано методику синтезу правил, щодо управління технологічним процесом обробки поверхонь.

9. Сидоренко А.Ю., Литвиненко М.В. Оптимизация контроля параметров шероховатости обработанных поверхностей // Материалы 10-й международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика-2003”. – Севастополь: СевНТУ – 2003. – Т.1. – С. 93.

Здобувачем запропоновано підхід щодо оптимізації контролю параметрів шорсткості опрацьованих оптичних поверхонь.

10. Сидоренко А.Ю., Мазманишвили А.С. Исследование устойчивости контроля параметров шероховатости обработанных поверхностей к погрешности при механической обработке // Материалы 11-й международной конференции по автоматическому управлению “Автоматика-2004”. – Киев: НУПТ. – 2004. – Т.2. – С. 41.

Здобувачем запропоновано підхід щодо вияву впливу алгоритму контролю якості параметрів шорсткості опрацьованих оптичних поверхонь до погрешностей при механічній обробки.

11. Мазманишвили А.С., Сидоренко А.Ю. Анализ параметров шероховатости при моделировании технологического процесса обработки оптических поверхностей // Анотації доповідей міжнародної науково-практичної конференції “MicroCAD-System”. – Харків: НТУ “ХП”. – 2004. – С. 27.

Здобувачем проаналізовано параметри шорсткості при моделюванні технологічного процесу обробки оптичних поверхонь.

12. Мазманишвили А.С., Сидоренко А.Ю. Контроль и управление качеством шероховатости обработанных поверхностей // Тезисы докладов III конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – Харьков: ННЦ ХФТИ. – 2005. – С. 65.

Здобувачем запропоновано підхід щодо контролю якості на основі статистичного оцінювання параметрів шорсткості механічно опрацьованих ОП.

13. Мазманишвили А.С., Сидоренко А.Ю. Концепция управления качеством при технологической обработке высококачественной поверхности // Материалы 12-й международной конференции з автоматичного управління “Автоматика-2005”. – Т.2. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2005. – С. 100.

Здобувачем реалізована концепція щодо управління якістю опрацьованих оптичних поверхонь.

14. Мазманишвили А.С., Сидоренко А.Ю. Коррелированные последовательности в задачах статистического оценивания // Материалы міжнародної науково-практичної конференції “Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології” – Чернівці: Буковинський університет. – 2006. – С. 300-301.

Здобувачем розглянуто вплив корельованих послідовностей у задачах статистичного оцінювання.

15. Мазманишвили А.С., Сидоренко А.Ю. Выбор положения системы координат при исследовании профилограмм поверхностного слоя оптических изделий // Тези доповідей 13-й міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика-2006”. – Вінниця: ВНТУ. – 2006. – С. 184.

Здобувачем удосконалено підхід щодо вибору положення системи координат для дослідження профилограм поверхневого шару оптичних виробів.

## АНОТАЦІЇ

**Сидоренко Г.Ю.** *Синтез автоматизованої системи управління якістю механічної обробки поверхні на основі статистичної оцінки параметрів шорсткості.* – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація технологічних процесів. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2007.

У роботі вирішено науково-практичне завдання розробки методики контролю й ефективної оцінки якості поверхні оптичних полімерних виробів після механічної обробки на основі статистичного оцінювання параметрів шорсткості. Запропонована методика дозволяє комплексно оцінити мікрогеометричний профіль поверхні оптичних виробів з погляду їх функціонального призначення. При такому підході поряд з основними стандартними висотними й кроковими параметрами, що характеризують шорсткість поверхні, ураховується форма й розташування нерівностей, які можуть приводити до порушення внутрішнього відбиття поверхонь оптичних виробів за рахунок розсіювання світлового пучка й зниження світлового виходу оптичних полімерів.

На основі ймовірнісного підходу при опису шорстких поверхонь оптичних виробів отримані вирази для дискретного критерію якості. Показано можливість контролю якості оптичної поверхні у випадку присутності сигнального й шумового компонентів профілю, а також оптимізації процесу управління якістю поверхневого шару й ухвалення правильного рішення про його стан.

Показано, що теоретичною основою для розв’язання завдань автоматичного управління й прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних полімерів може служити теорія стохастичних процесів.

Отримано аналітичний вираз для твірної функції адитивного квадратичного критерію якості. Розглянуто методику управління й прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних полімерних виробів у випадку, коли застосовується узагальнений стаціонарний гаусівський стохастичний процес.

Розроблено алгоритмічне й програмне забезпечення, що дозволяє обчислити правобічні граничні значення для квадратичного критерію якості, використовувати в якості прийняття рішень про якість поверхневого шару оптичних виробів. На підставі проведеного імітаційного моделювання технологічного процесу показаний вплив параметрів шорсткості оброблюваних виробів на оцінку якості поверхневого шару на всіх стадіях обробки поверхонь. Побудовано



математичні моделі формування якості поверхонь, засновані на теорії випадкових марківських процесів, а також визначених на них адитивних квадратичних функціоналів.

На підставі отриманих результатів розроблені алгоритми для автоматизованого процесу контролю й управління якістю оптичної поверхні на основі статистичного оцінювання параметрів шорсткості. Розроблені алгоритми використані в процесі проведення робіт з удосконалення систем управління процесом технологічної обробки оптичних полімерів, що дозволило забезпечити підвищення якості поверхневого шару плоских сцинтиляційних виробів “Tile”.

Розроблено методику оцінки якості вихідної структури полімерного оптичного матеріалу, що базується на теорії стохастичних процесів. Дана методика дозволяє при мінімальних фінансових і часових витратах прогнозувати одержання оптичного виробу після механічної обробки з необхідними вимогами по шорсткості й довгостроковій стабільності. Уперше встановлено, що величина гранично припустимого значення (квантилю) характеризує вихідну структуру оптичного полімерного матеріалу, при якій можливе одержання виробу з необхідними експлуатаційними властивостями.

**Ключові слова:** синтез автоматизованої системи управління, управління якістю стану поверхні, стохастичні моделі, статистичні оцінки, оптичні полімери, критерії якості.

*Сидоренко А.Ю. Синтез автоматизированной системы управления качеством механической обработки поверхности на основании статистической оценки параметров шероховатости. – Рукопись.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация технологических процессов. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2007.

В работе решена научно-практическая задача разработки методики контроля и эффективной оценки качества поверхности оптических полимерных изделий после механической обработки на основе статистического оценивания параметров шероховатости. Предлагаемая методика позволяет комплексно оценить микрогеометрический профиль поверхности оптических изделий с точки зрения их функционального назначения. При таком подходе наряду с основными стандартными высотными и шаговыми параметрами, характеризующими шероховатость поверхности, учитывается форма и расположение неровностей, которые могут приводить к нарушению внутреннего отражения поверхностей оптических изделий за счет рассеяния светового пучка и снижения светового выхода оптических полимеров.

На основе вероятностного подхода при описании шероховатых поверхностей оптических изделий получены выражения для дискретного критерия качества. Показана возможность контроля качества оптической поверхности в случае присутствия сигнальной и шумовой компонент профиля, а также оптимиза-

ции процесса управления качеством поверхностного слоя и принятия правильного решения о его состоянии.

Показано, что теоретической основой для решения задач управления и принятия решений о качестве поверхностного слоя оптических полимеров может служить теория стохастических процессов.

Получены аналитически выражения для производящей функции аддитивного квадратичного критерия качества. Рассмотрена методика управления и принятия решений о качестве поверхностного слоя оптических полимерных изделий в случае, когда применяется обобщенный стационарный гауссовский стохастический процесс.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее вычислить правосторонние квантили для аддитивного квадратичного критерия качества, используемые при принятии решений о качестве поверхностного слоя оптических изделий. Построены математические модели формирования качества поверхностей, основанные на теории случайных марковских процессов, а также определенных на них аддитивных квадратичных функционалов.

На основании полученных результатов разработаны алгоритмы для автоматизированного процесса контроля и управления качеством оптической поверхности после механической обработки на основе статистического оценивания параметров шероховатости. Разработанные алгоритмы использованы в процессе проведения работ по усовершенствованию систем управления процессом технологической обработки оптических поверхностей, что позволило обеспечить повышение качества поверхностного слоя плоских скнтилляционных изделий "Tile".

Разработана методика оценки качества исходной структуры полимерного оптического материала, базирующаяся на теории стохастических процессов. Данная методика позволяет при минимальных финансовых и временных затратах прогнозировать получение оптического изделия после лезвийной обработки с необходимыми требованиями по шероховатости и долговременной стабильности. Впервые установлено, что величина предельно допустимого порогового значения (квантиля) характеризует исходную структуру оптического полимерного материала, при которой возможно получение изделия с требуемыми эксплуатационными свойствами.

**Ключевые слова:** синтез автоматизированной системы управления, управление качеством состояния поверхности, стохастические модели, статистические оценки, оптические полимеры, критерии качества.

*Sydorenko G.Y. Automated tooling control system synthesis based on statistical roughness parameters estimation. – Manuscript.*

Thesis for candidate's degree by specialty 05.13.07 – Technological Processes Automation. – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2007.

The science-practical problem of the elaboration of the method of control and effective appreciation of the surface quality polymeric wares after tooling based on statistic appreciating parameters of roughness has been studied. The offered methodic allows to estimate microgeometric surface profile of optical wares with their func-

tional destination in complex. The approach includes basic standard parameters such as high-rise and stepping as well as shape and displacement of rough surfaces. It can better describe the infringement of internal reflection of surfaces of optical products due to dispersion of a light beams in a light output of optical polymers.

The formulas for discontinues quality criterions got based on probability-theoretical approach and describing of the rough surfaces of the optical ware. The possibility to control the quality of optical surfaces as well as the improvement of the control process has been shown. It is also shown the theory of accidental can be the theoretical base for solving management tasks of surface quality of the optical polymers. The procedure of control and making decision of surface layer's quality of optical polymeric ware when adapts the generalized stationary Gaussian stochastic process "signal and noise" has been examined.

Algorithms and software able to calculate right-side quantiles for the additive quadratic criterion of the qualities, used for making decisions about the quality of the surface layer of optical wares were developed. The mathematical models of forming the quality of surfaces, based on the theory of random Markov processes and additive quadratic functionals defined on them have been built.

Based on obtained results, algorithms for the automated process of monitoring and management of the quality of optical surface after mechanical processing on the basis of the statistical evaluation of the parameters of roughness were developed. The developed algorithms are used in the process of performing work on the improvement of the systems of control of the process of the technological treatment of optical surfaces, which made it possible to ensure an improvement in the quality of the surface layer of flat scintillation wares "Tile". Elaborated algorithms were used to improve process of the technological working of the optical surfaces. They allow increasing the quality of the surface layer of flat scintillation wares "Tile".

For the first time it is ascertained that the value of the maximum permissible threshold value (quantile) defines the reference structure of optical polymer materials, which permits to receive the ware with necessary operating behaviors.

**Key words:** synthesis of automated control system, product quality control, statistical estimation, stochastic model, optical polymers, performance criterion.