

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 53

АВГУСТ 2010

№ 8

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК  
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА  
ЧАСТЬ II

*Под редакцией доктора технических наук, профессора В. А. Валетова*

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
<b>ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ</b>	
Валетов В. А., Иванов А. Ю. Микрогеометрия поверхностей деталей и их функциональные свойства.....	7
Третьяков С. Д., Юльметова О. С. О проблемах оптимизации микрогеометрии поверхностного слоя деталей приборов.....	12
Юльметова О. С., Сисюков А. Н., Юльметова Р. Р. Создание базы данных непараметрических критериев оценки микрогеометрии функциональных поверхностей.....	15
Медунецкий В. М., Цимбал И. Р. Обеспечение качественных показателей пар трения, работающих в особых условиях.....	19
Яковлева С. А., Юльметова О. С. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций в приборостроении.....	23
Голубчиков М. А., Кузьмин Ю. П. Моделирование процесса вибронакатывания.....	26
Васильков С. Д., Тальнишних С. А. Исследование остаточных напряжений резистивным электроконтактным методом.....	30
<b>СБОРКА МИКРООБЪЕКТИВОВ</b>	
Падун Б. С., Латыев С. М. Интегрированная система автоматизации сборки микрообъективов.....	34
Алиев Т. И., Падун Б. С. Оптимизация процессов сборки микрообъективов.....	39

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ**

<b>Красильников А. В.</b> Проблемы создания средств освоения континентального шельфа Мирового Океана .....	47
<b>Валетов В. А., Красильников А. В.</b> Технологическая оснастка для отработки пусковых устройств подводных аппаратов .....	50
<b>АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>	
<b>Серков Е. А.</b> Автоматизация процесса проектирования групповых станочных приспособлений .....	56
<b>Грибовский А. А., Пирогов А. В., Алёшина Е. Е.</b> Использование технологии оптического сканирования при подготовке производства новых изделий.....	60
<b>Федосов Ю. В., Соболев С. Ф.</b> Построение учебного процесса в лаборатории поверхностного монтажа .....	64
<b>Чертовской В. Д.</b> Адаптивное автоматизированное планирование производства .....	67
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b> .....	74
<b>SUMMARY</b> ( <i>перевод Ю. И. Копилевича</i> ) .....	78

## THEMATIC ISSUE

# ACTUAL PROBLEMS OF TECHNOLOGICAL PREPROCESSING

## PART II

*Edited by V. A. Valetov, Doctor of Technical Science, Professor*

## CONTENTS

PREFACE .....	5
<b>IMPROVEMENT OF PRODUCE QUALITY</b>	
<b>Valetov V. A., Ivanov A. Yu.</b> Microgeometry and Functional Characteristics of Machine Parts Surfaces .....	7
<b>Tretyakov S. D., Yulmetova O. S.</b> On Optimization Problems for Microgeometry of Machine Part Surface Layer .....	12
<b>Yulmetova O. S., Sisyukov A. N., Yulmetova R. R.</b> Creation of Database of Nonparametric Criteria for Estimation of Functional Surface Microgeometry .....	15
<b>Medunetsky V. M., Tsimbal I. R.</b> Provision of Quality Characteristics of Friction Couple under Special Operating Conditions .....	19
<b>Yakovleva S. A., Yulmetova O. S.</b> Dimensional Stability of Materials and Constructional Elements in Instrument Making .....	23
<b>Golubchikov M. A., Kuzmin Yu. P.</b> Modeling of Vibratory Burnishing .....	26
<b>Vasilkov S. D., Talnishnikh S. A.</b> Investigation of Residual Stress by the Electrocontact Method .....	30
<b>MICROLENS ASSEMBLY</b>	
<b>Padun B. S., Latyev S. M.</b> Integrated System of Automated Assembly of Microlenses .....	34
<b>Aliev T. I., Padun B. S.</b> Optimization of Microlens Assembly Processes .....	39
<b>TOOL SET FOR SUBMARINE APPARATUS RESEARCH</b>	
<b>Krasilnikov A. V.</b> Problems of Means Creation for the Ocean Shelf Development .....	47
<b>Valetov V. A., Krasilnikov A. V.</b> Tool Set for Fine-Tuning of Submarine Apparatus Starting Device .....	50

## **ACTUAL PROBLEMS OF INSTRUMENT MAKING**

<b>Serkov E. A.</b> Computer-Aided Design of Group Machine Appliances .....	56
<b>Gribovsky A. A., Pirogov A. V., Aleeshina E. E.</b> Application of Optical Scanning technology to new manufacture produce preproduction.....	60
<b>Fedosov Yu. V., Sobolev S. F.</b> Organization of Educational Process in Surface Mounting Laboratory.....	64
<b>Chertovskoy V. D.</b> Adaptive Computer-Aided Production Scheduling.....	67
<b>INFORMATION</b> .....	74
<b>SUMMARY</b> .....	78

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Технологическая подготовка производства (ТПП) является главным этапом при любом типе производства и изготавливаемой продукции.

ТПП современных приборов и систем настолько сложна и многогранна, что требует для своей реализации участия специалистов многих направлений и специальностей. Столь же многогранны и научные исследования в этой области. Решающая роль технологической науки и практики в современном мире общепризнана, поэтому публикации результатов исследований в области ТПП могут представлять большой интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Кафедра ТПС СПбГУ ИТМО, являясь головной в России по специальности „Технология приборостроения“, активно работает во всех основных областях технологической подготовки производства приборов и систем. Результаты исследований сотрудников кафедры в некоторых областях ТПП опубликованы в шестом номере журнала, в настоящем выпуске помещены 15 статей, посвященных рассматриваемой тематике.

*Профессор кафедры технологии приборостроения  
Санкт-Петербургского государственного университета  
информационных технологий, механики и оптики,  
доктор технических наук В. А. ВАЛЕТОВ*

## PREFACE

Technological preproduction is the principle component of production for all kinds of manufacturing enterprises and produce.

Preproduction of modern instruments is so complex and versatile that it calls for involvement of specialists in various fields and applications. Scientific researches in this area are equally versatile. Primary importance of technological science and practice in modern world is universally recognized, and that is why publication of results of investigations in the field of preproduction is of principle interest both from theoretical and practical points of view.

Department of in St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics is the leading educational institute in instrument-making technology and is deeply involved in all the main areas related to preproduction of instruments and systems. Results of investigations carried out by the Department staff have been published earlier in 6<sup>th</sup> issue of the Journal; this issue contains 15 more papers entering into the treatment of the problem.

*V. A. VALETOV*  
*Doctor of Technical Sciences, Professor*

---

---

# ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

---

---

УДК 621.81.004.17:620.191.355.001.5

В. А. ВАЛЕТОВ, А. Ю. ИВАНОВ

## МИКРОГЕОМЕТРИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ И ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Обоснована целесообразность использования непараметрического подхода к решению задач оптимизации характеристик поверхностного слоя деталей для различных функциональных свойств поверхностей.

*Ключевые слова:* микрогеометрия поверхностей деталей, характеристики поверхностного слоя деталей, оптимизация характеристик поверхностного слоя, измерение, контроль.

Как известно, в 1975 г. официально был введен в действие ГОСТ 2789-73 на шероховатость поверхностей деталей и сразу стала сказываться его полная метрологическая необеспеченность, которая, в несколько меньшей степени, сохранилась до сих пор. Однако это не главная проблема параметрических стандартов: в большинстве зарубежных стран введение аналогичных стандартов сопровождалось полным метрологическим обеспечением, но практический результат один — невозможность оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для их конкретных функциональных свойств.

Ранее шероховатость поверхностей деталей регламентировалась с помощью классов шероховатости, а их соответствие требованиям чертежей оценивалось визуально. Главным недостатком такого метода является несовершенство зрения и неоднозначность мнений людей, т.е. субъективизм, а ныне действующие стандарты имеют, по нашему мнению, еще больший недостаток — слишком низкую информативность своих параметрических критериев оценки и контроля шероховатости поверхностей.

Оптимизация микрогеометрии практически невозможна без обязательного выполнения следующих четырех условий:

- оптимальную микрогеометрию для интересующего функционального свойства поверхности нужно знать;
- известную оптимальную микрогеометрию нужно точно задать на чертеже детали (нормировать);
- необходимо иметь возможность технологически обеспечить при изготовлении детали заданную на чертеже микрогеометрию;
- нужно иметь возможность быстро, точно и с приемлемыми экономическими затратами проконтролировать полученную при изготовлении детали микрогеометрию.

Использование существующих параметрических стандартов делает практически невыполнимым второе условие, поскольку для точного описания профиля поверхности требуется от трех (в простейшем случае) до двадцати пяти параметров. Непригодность этих стандартов для оптимизации микрогеометрии наглядно демонстрирует пример, приведенный на рис. 1, где изображены профили двух зеркально противоположных поверхностей.

Все практически используемые параметры шероховатости, например  $R_a$  и  $R_z$ , для этих профилей абсолютно одинаковы, а неодинаковость функциональных свойств, зависящих от микрогеометрии, для таких поверхностей не требует доказательств. В реальности  $R_a$  и  $R_z$  характеризуют всего лишь степень „гладкости“ поверхности, чего явно недостаточно для описания большинства ее функциональных свойств.

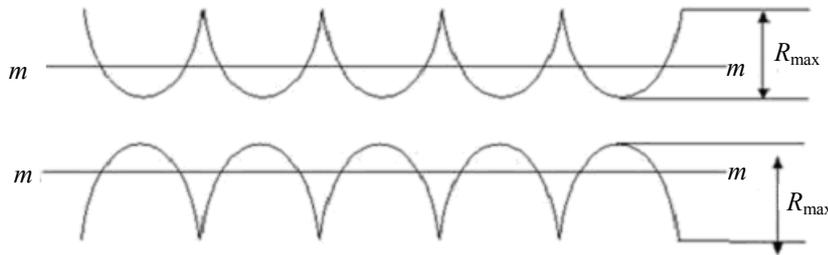


Рис. 1

Следует подчеркнуть условность в данном случае термина „оптимизация“ микрогеометрии. В действительности речь может идти только о нахождении лучшей микрогеометрии из возможных в условиях конкретного производства. Тем не менее пренебрегать возможностью и такой „оптимизации“ — это большое расточительство. Дело в том, что уже доказано существенное влияние микрогеометрии на два десятка функциональных свойств поверхностей. Но даже для доказанных случаев при использовании существующих параметрических стандартов процесс оптимизации микрогеометрии практически не реализуем.

Неэффективность применения стандартных параметров шероховатости поверхностей стала очевидной уже давно. Это доказывают множество публикаций отечественных и зарубежных авторов [1—11], которые либо предлагали все новые параметры, либо пытались изобрести так называемый комплексный параметр, обеспечивающий корреляцию с конкретными функциональными свойствами поверхностей. В теории случайных функций и случайных полей давно доказана бесперспективность таких попыток.

В семидесятых годах XX в. нами впервые был предложен новый метод оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей, который был назван непараметрическим. В многочисленных публикациях были рассмотрены все необходимые для практического использования аспекты этого метода [12—24]. У авторов нет информации о каком-либо опубликованном доказательстве неприемлемости предложенного метода или хотя бы отрицательном отзыве на эти публикации, поэтому о причинах „прохладного“ отношения к этому методу можно только догадываться.

Так как в немногочисленных пока случаях практического применения непараметрического подхода к оценке и контролю характеристик поверхностного слоя деталей (не только микрогеометрии [20]) получены положительные результаты, считаем целесообразным кратко повторить сущность и методику практического использования этого метода применительно к оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей приборов и машин.

Сущность предложенного метода заключается в использовании в качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей графических изображений различных функций. В менее „ответственных“ случаях это могут быть графики опорных кривых (кривых Аббота) и функций распределения ординат или тангенсов углов наклона профилей, а для более точной оценки и контроля — графики плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей. При создании программ распознавания графических изображений в качестве критериев лучше использовать графики самих профилей и в пределе — графические изображения микро топографии поверхностей. Последнее практически означает возврат к комплексной оценке, характерной для ранее использовавшихся образцов шероховатости, но с исключением субъективизма оценки, поскольку все операции предполагают полную компьютеризацию процесса.

Для исследования влияния исходной микрогеометрии на конкретное функциональное свойство поверхности изготавливается максимально возможное количество испытуемых образцов, которые будут различаться только исходной микрогеометрией. Практически это означает, что изготавливаются образцы одинаковых размеров и формы (желательно стандартных) из одной и той же партии конструкционного материала, обладающего практически одинаковыми химическими, физическими, механическими и технологическими свойствами. Для создания разного исходного микрорельефа на каждом образце используются различные (из доступных) методы и режимы обработки. Для исключения влияния побочных факторов, например, разной степени наклепа, все образцы после создания на них различного исходного микрорельефа целесообразно подвергнуть термообработке для снятия остаточных напряжений. С целью повышения достоверности эксперимента для каждого варианта исходного микрорельефа желательно изготовить несколько одинаковых образцов. Все изготовленные вышеуказанным способом образцы подвергаются одинаковому функциональному воздействию с контролем характеристик этого функционального свойства. В результате испытаний выявляются образцы, показавшие различный уровень функционального свойства поверхности, в том числе наивысший. Микрорельеф такого наилучшего образца принимается в качестве оптимального для данного функционального свойства\*.

Определив в результате эксперимента наилучший из возможных микрорельефов для данного функционального свойства поверхности, можно автоматически получить и технологические методы его воспроизведения. База данных по установлению оптимальной микрогеометрии и технологических методов ее обеспечения со временем может настолько наполниться, что не потребуются проведения специальных экспериментов, а можно будет воспользоваться уже имеющимися в базе данных сведениями.

До начала испытаний серии образцов на конкретное функциональное воздействие с рабочей поверхности каждого образца необходимо снять профиль, по соответствующей программе обработать его на компьютере и результаты обработки занести в базу данных.

Любой непараметрический критерий, например, график функции плотности распределения ординат профиля (или кривую Аббота), полученный для профиля лучшего по результатам испытаний образца, следует использовать в качестве эталона. В зависимости от степени важности изделия можно установить любой конкретный допуск на отклонение непараметрического критерия контролируемого образца от эталонного критерия. На рис. 2 представлена эталонная плотность распределения ординат профиля с допуском на возможные ее отклонения ( $Y_i$  — текущая ордината профиля,  $W$  — вероятность появления этой ординаты).

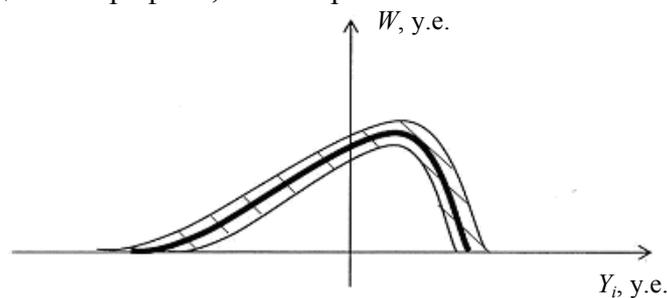


Рис. 2

При контроле микрогеометрии любого серийного образца достаточно совместить соответствующий непараметрический критерий, полученный для его профиля, с эталоном. Если графическое изображение непараметрического критерия не выходит за пределы допуска относительно эталона, контролируемую микрогеометрию следует отнести к удовлетворитель-

\* При изготовлении образцов с разной исходной микрогеометрией виды и режимы обработки каждого образца должны быть зафиксированы.

ной. При выходе непараметрического критерия контролируемой микрогеометрии за пределы допуска изделие следует браковать по требованиям к шероховатости поверхности.

Как было указано выше, установлено существенное влияние микрогеометрии на два десятка функциональных свойств поверхности. Для нормирования оптимальной микрогеометрии необходимо каждому такому функциональному свойству присвоить постоянный номер. Этот номер следует проставлять на знаке шероховатости, форма которого не имеет принципиального значения, вместо не имеющих практического смысла параметрических критериев. Таким образом, следует нормировать конкретное функциональное свойство поверхности. Эта методика содержит в себе дополнительную внутреннюю логику. Если современный конструктор, проставляя на чертеже значения каких-либо параметров шероховатости, иногда даже не знает их сути, то нормирование функциональных свойств исключает такое „слепое“ нормирование. Многие конструкторы могут забыть физический смысл используемых ими параметров шероховатости, в основном в силу практической бессмысленности последних, но трудно себе представить конструктора, который не знает функционального назначения создаваемого им изделия. Это является еще одним существенным доказательством целесообразности нормирования микрогеометрии по функциональным свойствам поверхности.

В поставленной проблеме есть еще один важный нюанс. Действующие стандарты обязывают нормировать, а значит и контролировать, микрогеометрию всех без исключения поверхностей деталей. Какой смысл нормировать и контролировать микрогеометрию нефункциональных поверхностей или поверхностей, функциональные свойства которых не зависят или не существенно зависят от их микрогеометрии? Это еще один довод в пользу целесообразности коренного изменения стандартов на микрогеометрию поверхностей деталей приборов и машин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валетов В. А. Возможные критерии оценки шероховатости обработанных поверхностей // Тр. ЛКИ. 1976. Вып. 108. С. 135—140.
2. Валетов В. А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шероховатости поверхности // Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении. Л.: ЛКИ, 1978. С. 62—65.
3. Валетов В. А. Использование новых критериев для оценки микрогеометрии поверхностей деталей машин // Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами машин. Киев: Институт сверхтвердых материалов АН УССР, 1980. С. 23—25.
4. Валетов В. А. Влияние исходной микрогеометрии на коэффициент сопротивления качению и долговечность роликовых направляющих // Трение и износ. 1982. Т. III, № 5. С. 914—918.
5. Валетов В. А. Влияние фильтрации профиля на правильность оценки зависимости функциональных свойств поверхности от ее микрогеометрии // Вопросы изготовления, сварки и монтажа судостроительных конструкций. Л.: ЛКИ, 1982. С. 144—149.
6. Валетов В. А. Изменение микрогеометрии поверхностей трения деталей цилиндро-поршневой группы судовых дизелей в процессе их работы // Трение и износ. 1983. Т. 4, № 6. С. 1104—1107.
7. Валетов В. А. Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей в приборостроении. Л.: ЛИТМО, 1989. 100 с.
8. Валетов В. А. Целесообразность изменения стандарта на шероховатость поверхностей деталей // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. № 6. СПб: СЗПИ, 1997. С. 118—121.
9. Валетов В. А., Иванов С. Ю. Проблемы комплексной оценки и контроля характеристик поверхностного слоя деталей машин и приборов // Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем. СПб, 2002. С. 164—167.
10. Витенберг Ю. Р. Система характеристик шероховатости поверхности // Вестн. машиностроения. 1970. № 11. С. 56—58.

11. Демкин Н. Б., Курова М. С. Распределение выступов и впадин профиля шероховатости поверхности // Изв. вузов. Машиностроение. 1975. № 7. С. 58—62.
12. Крагельский И. В., Комбалов В. С. Расчет величины стабильной шероховатости после приработки (упругий контакт) // ДАН СССР. 1970. Т. 193, № 3. С. 554—556.
13. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
14. Крагельский И. В., Рудзит Я. А. Методика определения средних значений радиусов закругления вершин неровностей профиля шероховатости // Приборостроение. 1968. № 3. С. 15—24.
15. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.
16. Рудзит Я. А. Расчет средних значений главных радиусов кривизны вершин микронеровностей // Приборостроение. 1968. Вып. 3. С. 3—14.
17. Рудзит Я. А. О параметрах шероховатости поверхностей, обработанных абразивными инструментами // Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки. Л.: СЗПИ, 1974. С. 63—75.
18. Хусу А. П., Витенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей. М.: Наука, 1975. 344 с.
19. Nayak P. R. Random Process Model of Rough Surfaces // G. Lubr. Tech., Trans. ASME. 1971. July. P. 398—407.
20. Sayles R. S., Thomas T. R. Stiffness of Machine Tool Joints: A Random Process Approach // J. Eng. Ind., Trans. ASME. 1977. February. P. 250—256.
21. Waletow W., Stauffert G. Beobachtungen beim Rauheitmessen // Technische Rundschau. 1980. N 50/51. S. 16.
22. Waletow W., Stauffert G. Moderne Methoden der Oberflaechenforschung // Technische Rundschau. 1981. N 10. S. 5—7.
23. Whitehouse D. J., Archard J. F. The Properties of Random Surfaces of Significance in their Contact // Proc. Roy. Soc. London. 1970. Ser. A. N 316. P. 97—121.
24. Waletov W. A., Grabow J. Neue Verfahren auf dem Gebiet der Analyse und Kontrolle der Oberflaechenmikrogeometrie // 41 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium. 1996. Bd 2. S. 622—625.

**Сведения об авторах**

- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: valeto@tps.ifmo.ru
- Андрей Юрьевич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: auivanov@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

С. Д. ТРЕТЬЯКОВ, О. С. ЮЛЬМЕТОВА

## О ПРОБЛЕМАХ ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

Рассматривается проблема малой информативности стандартизированных параметрических критериев оценки микрогеометрии применительно к задачам оптимизации микрорельефа поверхностей деталей приборов для конкретного функционального свойства.

*Ключевые слова:* функциональные свойства, непараметрические критерии оценки, оптимизация микрогеометрии.

Одним из важнейших факторов успешной деятельности предприятия в условиях жесткой рыночной конкуренции является постоянное повышение качества выпускаемой продукции. В приборостроении, где требования к качеству изделий особенно высоки, повышение надежности и долговечности приборов невозможно без обеспечения оптимальной точности и качества поверхностного слоя их деталей.

Существует значительное количество различных по своей сути функциональных свойств, на которые оказывает влияние микрогеометрия поверхностного слоя деталей приборов. При этом создание оптимального микрорельефа поверхности для того или иного функционального свойства позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики приборов, что представляется особенно важным, так как в настоящее время возможности традиционных методов повышения качества изделий, связанных с возрастанием точности размеров и формы поверхности практически исчерпаны и создание оптимального микрорельефа рабочих поверхностей деталей является одним из основных и наиболее эффективных методов повышения качественных показателей машин и приборов.

Исследования по оптимизации микрогеометрии рабочих поверхностей деталей проводятся в течение нескольких десятилетий, в основной своей массе они направлены на решение проблемы с помощью параметрического описания микрогеометрии поверхности. Например, в свое время широкое распространение получила теория о так называемой „равновесной“ шероховатости, под которой принято понимать шероховатость, устанавливающуюся на контактирующих поверхностях при неизменном режиме трения после завершения процесса приработки [1, 2].

Выводы относительно роли „равновесной“ шероховатости в процессах изнашивания при трении, к которым пришли многие исследователи, нашли широкое применение в промышленности. Но, как оказалось, в условиях реального производства применение теории „равновесной“ шероховатости далеко не всегда позволяет достичь наилучших эксплуатационных характеристик при работе деталей приборов на износ. Основной причиной является тот факт, что, базируясь на стандартных критериях оценки микрогеометрии поверхности, которые могут определить лишь отдельные, усредненные, характеристики отклонений реальной поверхности от идеальной, такие исследования не могут дать точной оценки микрогеометрии поверхностей. В большинстве случаев для оценки микрогеометрии поверхностей использовался лишь один из наиболее распространенных параметрических критериев оценки микрогеометрии. Абсолютно очевидна неинформативность таких критериев (тем более применяемых по одиночке), а использование комплексной параметрической оценки шероховатости поверхности на практике нереально.

Таким образом, для того чтобы успешно решить задачу оптимизации микрогеометрии поверхностей, необходимо иметь возможность полного и точного описания микрорельефа

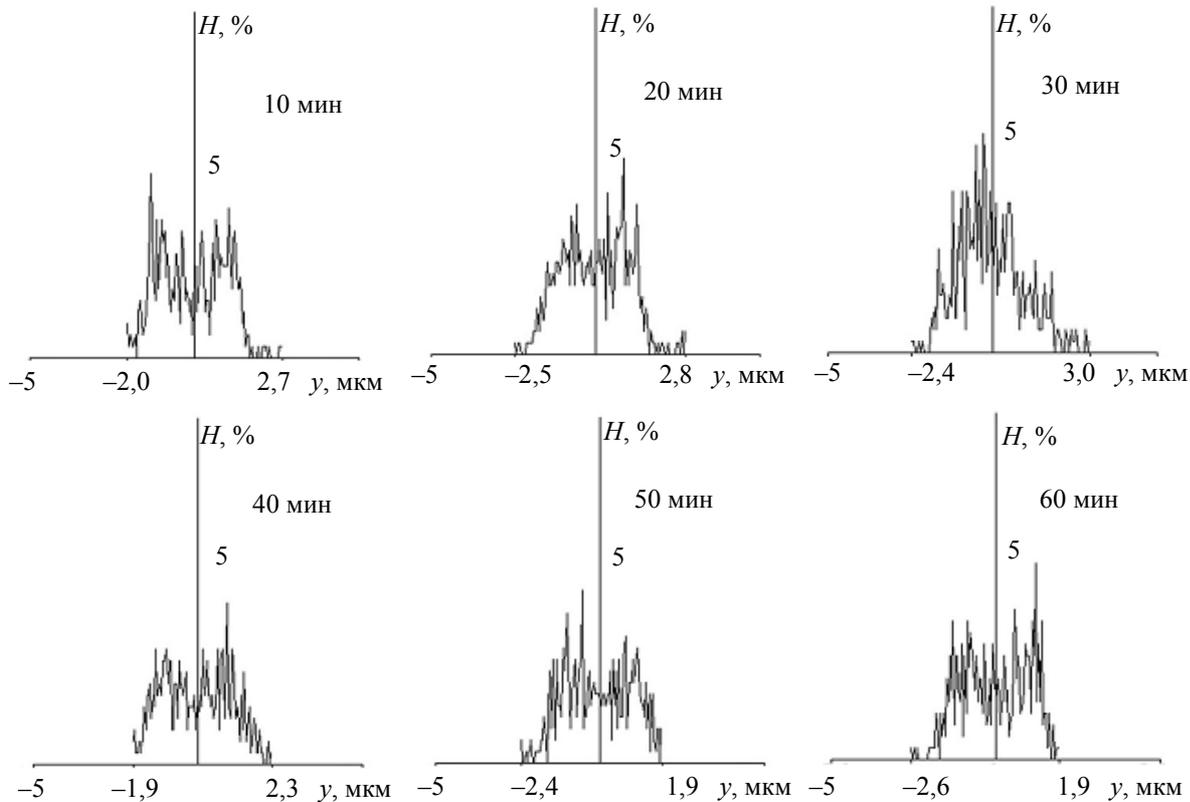
функциональных поверхностей, что практически невозможно при использовании стандартизованных параметрических критериев оценки микрорельефа. Один из авторов гипотезы о „равновесной“ шероховатости, В. А. Комбалов, отмечал, что высотные параметры  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  и  $R_{max}$  недостаточно полно определяют функциональные свойства поверхностей применительно к проблемам трения и изнашивания. Но предложенный им комплексный критерий оценки шероховатости не мог решить проблему точности в оценке микрорельефа поверхности, поскольку базировался все на тех же параметрических критериях  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  и т.д. [1].

Для решения проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей при трении необходимо отказаться от параметрического подхода их оценки и пользоваться более информативными критериями. Известно, что микрогеометрия реальной обработанной поверхности зависит от большого количества различных факторов (вида обработки, ее режима, вибрации технологической системы и т.д.), поэтому ее следует рассматривать как реализацию случайного поля. Значит, профиль поверхности есть реализация случайной функции. Таким образом, самую полную информацию о профиле содержат функции плотности распределения его ординат и углов наклона, и соответственно в качестве критериев оценки микрогеометрии поверхности используются графики этих функций. Такой подход к оценке микрогеометрии, названный „непараметрическим“, был предложен В. А. Валетовым [3]. Непараметрический подход к оценке микрогеометрии функциональных поверхностей позволяет не только решить проблему малой информативности стандартных параметрических критериев, но и открывает перед исследователями новые возможности применения методов оптимизации микрогеометрии поверхностей. Для оценки микрорельефа поверхности могут использоваться графики функции плотности распределения и функции распределения ординат и углов наклона профиля. Использование графиков функций распределения ординат и углов наклона профиля целесообразно применять для приближенной оценки [3]. Разработана целая методика по оптимизации микрогеометрии различных поверхностей, учитывающая непараметрические критерии, что позволяет вывести исследования по оптимизации микрорельефа поверхностей трения—скольжения на „практические рельсы“.

К наиболее часто применяемым непараметрическим критериям оценки микрогеометрии поверхности можно отнести плотность распределения ординат безразмерного профиля и ее функцию, плотность распределения тангенсов углов наклона профиля и ее функцию, плотность распределения ординат профиля и ее функцию. Таким образом, появляется возможность не только более достоверной проверки некоторых выводов и рекомендаций по оптимизации микрогеометрии поверхностей трения, которые были сделаны ранее на основе параметрических критериев, например гипотезы о „равновесной“ шероховатости, но и установить истинную картину изменения микрогеометрии поверхности при трении, что, безусловно, позволит вывести исследования по оптимизации микрорельефа поверхностей на качественно новый уровень.

Как уже было отмечено выше, применение на практике теории о „равновесной“ шероховатости, не всегда обеспечивает оптимальный результат. Можно предположить, что непараметрический подход к исследованию шероховатости позволил бы не только опровергнуть ее, но и выявить истинный характер изменения микрогеометрии поверхностей в процессе их трения. Был проведен ряд экспериментов по испытанию образцов на трение. При неизменных режимах работы пар трения производилось измерение микрогеометрии поверхностей трения с одинаковыми временными интервалами. Соответственно измерения проводились с помощью как стандартизованных параметрических, так и непараметрических критериев оценки. В результате после завершения процесса приработки наблюдалась следующая картина: параметрические характеристики микрогеометрии поверхности оставались на одном уровне, тогда как характер микрогеометрии, который с высокой степенью точности позволили зафиксировать непараметрические критерии, постоянно изменялся [4].

На рисунке представлены графики функций плотности распределения ординат профиля поверхности, микрорельеф которой исследовался после каждых десяти минут работы образцов на трение. Анализируя эти графики, можно заметить, что пикообразный „всплеск“, который представляет собой наиболее характерный для данной поверхности уровень впадин (вершин), циклически смещается то в область впадин, то в область вершин.



Таким образом, очевидно, что непараметрический подход к проблеме оптимизации микрогеометрии позволяет с успехом решать проблемы по оптимизации конкретных функциональных свойств приборов, которые зависят от характера микрорельефа поверхностей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-00158а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974.
2. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М., 1977.
3. Валетов В. А. Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей в приборостроении. Л., 1989.
4. Валетов В. А. Изменение микрогеометрии поверхностей трения деталей цилиндропоршневой группы судовых дизелей в процессе их работы // Трение и износ. 1983.

#### Сведения об авторах

**Сергей Дмитриевич Третьяков**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: tretiserge@mail.ru

**Ольга Сергеевна Юльметова**

— Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; ассистент; E-mail: www.ralli@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

О. С. ЮЛЬМЕТОВА, А. Н. СИСЮКОВ, Р. Р. ЮЛЬМЕТОВА

## СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ МИКРОГЕОМЕТРИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Обосновывается необходимость создания базы данных непараметрических критериев оценки микрогеометрии функциональных поверхностей. Рассматриваются этапы ее проектирования с выбором инструментальных средств разработки и описанием структурно-логической схемы построения базы данных.

*Ключевые слова:* функциональные свойства, непараметрические критерии оценки, проектирование базы данных, система управления базой данных.

Эффективность эксплуатации изделий приборостроения существенным образом зависит от качества изготовления входящих в их состав деталей, которые имеют функциональные поверхности, подвергаемые в процессе эксплуатации механическим, электрическим, трибологическим и другим видам нагрузки. Физические характеристики функциональных поверхностей, получаемых, как правило, посредством механической обработки, в значительной степени определяются формой и величиной микронеровностей (шероховатостью) последних. Требования к качеству функциональных поверхностей, а также возможность эффективного управления их механической обработкой в значительной степени зависят от технических методов контроля и измерения шероховатости.

Микрогеометрия функциональных поверхностей деталей, подвергнутых механической обработке, определяет эксплуатационные свойства изделия и измеряется с использованием метода контактно-щупового контроля. Этот метод основан на контактном движении датчика-преобразователя по шероховатой поверхности, в результате которого получают профиль поверхности. Обработка этого профиля с целью выявления степени влияния шероховатости на то или иное функциональное свойство может проводиться различными способами.

Традиционно отечественные и зарубежные исследования шероховатости проводятся с использованием параметрического описания профиля. В частности, Ю. Г. Шнейдером была выявлена взаимосвязь эксплуатационных характеристик изделий, таких как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость, с геометрическими параметрами их микро-рельефа — средним арифметическим отклонением профиля, средним шагом неровностей по вершинам, радиусом закругления неровностей и т.д. [1].

В дальнейшем исследования влияния микрогеометрии на функциональные и эксплуатационные свойства велись на базе предложенных В. А. Валетовым более информативных непараметрических критериев оценки, а именно функций плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей [2].

На сегодняшний день актуальна задача создания единой информационной модели, позволяющей в упорядоченном виде хранить данные (координаты профиля), с помощью которых можно построить графические изображения непараметрических кривых, описывающих оптимальную микрогеометрию для конкретных функциональных свойств изделия. При этом поиск оптимальной микрогеометрии подразумевает экспериментальное определение наилучшей микрогеометрии для конкретного функционального свойства. В рамках экспериментального поиска необходимо:

- изготовить серию образцов;
- зафиксировать виды и режимы их обработки;

- снять профили поверхностей образцов;
- построить необходимые критерии оценки микрогеометрии;
- подвергнуть образцы одинаковому функциональному воздействию;
- осуществить контроль величины функциональных характеристик;
- выявить образец, максимально отвечающий предъявленному требованию.

Микрорельеф наилучшего образца принимается в качестве оптимального для данного функционального свойства.

База данных, содержащая непараметрические критерии оценки микрогеометрии функциональных поверхностей, позволит:

- накапливать информацию по виду непараметрических кривых для конкретных функциональных свойств;
- получать сведения о виде оборудования и инструменте, режимах резания и материале, необходимых для получения оптимальной микрогеометрии, описывающей требуемое функциональное свойство.

В основу разработки базы данных (БД) положена структурно-логическая схема, представленная на рис. 1.



Рис. 1

Из схемы видно, что условно в БД выделены три информационных блока: конструкторский, технологический и метрологический. Каждый блок несет специфическую информацию, например, в конструкторском содержатся характеристики, определяемые конструктором: марка материала, форма детали или узла, а также ее наименование; в технологическом — перечень двух последних операций, так как именно на этом этапе формируется рабочий микрорельеф поверхности детали или узла; наименование и марка станка и инструмента, а также

режимы обработки — эти данные необходимы для поиска и технологического обеспечения оптимальной микрогеометрии. Немаловажным является блок, содержащий дополнительную информацию об обработке, например сведения о дисперсности притирочных паст, которая во многом определяет свойства полученного в процессе доводки микрорельефа.

Последний блок содержит метрологическую информацию, а именно: данные о длине пройденной трассы в процессе определения микрогеометрии контактно-щуповым методом, радиус использованного щупа, направление движение щупа, информацию о произведенной фильтрации. При этом все блоки объединяет конкретное функциональное свойство.

Процесс создания базы данных включает ряд последовательных этапов:

- выбор системы управления базой данных СУБД (реляционной — РСУБД, объектной — ОСУБД, объектно-реляционной — ОРСУБД, транзакционной встраиваемой);
- определение вида разрабатываемого прикладного обеспечения (web-ориентированное, GUI-ориентированное (graphical user interface), консольное, сервис-ориентированное);
- анализ существующих сред разработки прикладного программного обеспечения (ПО) и языков программирования с выбором средств разработки;
- проектирование структуры базы данных и ее объектов (типы, таблицы, виды, индексы, хранимые функции, процедуры, запросы и т.д.);
- разработка приложения (построение интерфейса и организация взаимодействия с СУБД).

На первом этапе проектирования следует определить тип СУБД.

Из реляционных СУБД наиболее распространенными вариантами будут MS SQL Server 2005/2008 и MySQL Server 5. Но реляционная СУБД, дополненная средствами объектной СУБД, является более предпочтительной по соотношению производительность—функциональность. Среди наиболее известных ОРСУБД можно выделить Oracle Database и PostgreSQL. Также вызывают интерес встраиваемые СУБД, например, Oracle Berkeley DB или MySQL Embedded.

В дальнейшем предполагается использовать создаваемое ПО в распределенной среде с единой БД, поэтому от использования варианта встраивания придется отказаться. Распределенная РСУБД MS SQL Server 2005 и ОРСУБД Oracle являются платными продуктами и тоже исключаются. В силу свободного распространения PostgreSQL остановим свой выбор на ней.

На втором этапе необходимо определить вид разрабатываемого ПО. Выбор GUI-приложения обусловлен возможностью выполнения большей части логики ПО на рабочей станции пользователя, что разгружает серверную составляющую приложения в клиент-серверной архитектуре.

Следующие этапы проектирования БД предполагают определение языка доступа к БД и среды программирования.

Выбор языка программирования предлагается осуществить из следующего списка: C++, Delphi (Pascal), C#, Python, Java. Так как их функциональность примерно одинакова, то критерием выбора будет кроссплатформенность и снижение трудозатрат.

Из предложенного перечня языков наиболее гибким средством является C++. Однако этот язык в большей степени удобен в системном программировании. Написание ПО с графическим интерфейсом, даже с использованием GUI-библиотек (Qt) и алгоритмических библиотек (boost), будет с точки зрения времени разработки нерациональным решением. Недостатком языка Delphi (Pascal) является отсутствие его кроссплатформенности.

В силу гибкости, безопасности языка C# и производительности SQL Server 2005 интересна связка языка C# (среда программирования .NET) с SQL Server. Отказ от нее обусловлен ограничением платформы .NET семейством операционных систем (ОС) Windows.

Объектно-ориентированный язык Python идеально подойдет в качестве надстройки над главным приложением при построении баз знаний. Наличие C++ и Java-вариаций Python

делает его сравнительно гибким. Но простота декомпиляции байт-кода исключает возможность его использования для создания базового приложения.

Таким образом, в качестве средства разработки ПО выбираем бесплатную среду NetBeans IDE 6.5 от Sun и язык программирования Java SE [3].

Выбранные компоненты, участвующие в процессе создания и функционирования приложения, дают следующие преимущества:

- бесплатны для разработчика;
- кроссплатформенны (не ограничены ОС);
- функциональны и удобны в использовании.

Такой выбор программных средств позволяет разработчику создавать коммерческие приложения без начальных инвестиций в средства разработки и сопутствующее ПО.

На заключительном этапе проектирования определяется структура БД, формируется графический интерфейс (рис. 2), создается логика приложения, посредством которой организуется взаимодействие пользователя с СУБД.

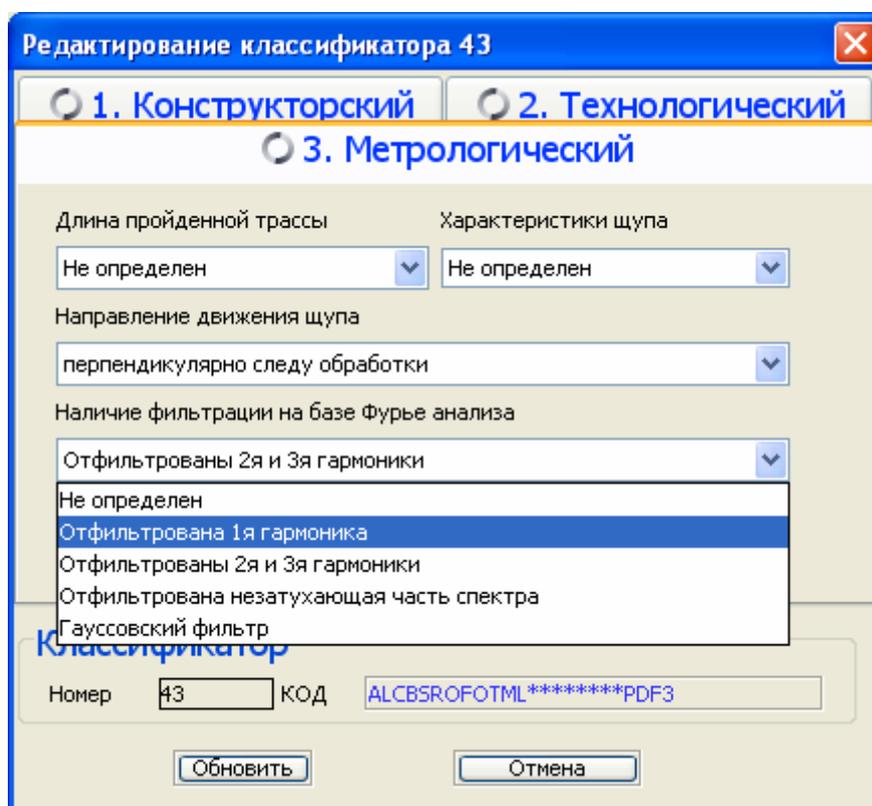


Рис. 2

Разработанная БД состоит из модифицируемых справочников классификатора, основной таблицы учета, схемы настроек, таблиц модулей (конструкторский, технологический, метрологический). Для разгрузки основной логики приложения часть кода перенесена на СУБД и реализована в виде хранимых процедур.

Спроектированное приложение позволяет вести учет проводимых экспериментов, регистрировать новые классификаторы, осуществлять поиск в базе данных по частичным критериям. В дальнейшем предполагается расширить функционал большей интерактивностью, возможностью совмещения измеренного профиля с эталонным для конкретного функционального свойства.

Созданная БД позволит накапливать и хранить сведения по виду непараметрических кривых, соответствующих определенному уровню функционального свойства, способу их

технологического обеспечения и метрологического контроля, что играет важную роль в процессе оптимизации микрогеометрии для функциональных свойств при решении проблемы повышения качества изделий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-00158а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. СПб: СПбГУИТМО (ТУ), 2001. 264 с.
2. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: ПИМаш, 2006. 168 с.
3. Хорстманн К. С., Корнелл Г. Java 2. Т. 2. Тонкости программирования. М.: Вильямс, 2007.

#### *Сведения об авторах*

- Ольга Сергеевна Юльметова** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; ассистент; E-mail: [www.ralli@rambler.ru](mailto:www.ralli@rambler.ru)
- Артем Николаевич Сисюков** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; ассистент; E-mail: [i@an.spb.ru](mailto:i@an.spb.ru)
- Рина Ринатовна Юльметова** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: [rina-yulmetova@yandex.ru](mailto:rina-yulmetova@yandex.ru)

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

УДК 620.178.16

В. М. Медунецкий, И. Р. Цимбал

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАР ТРЕНИЯ, РАБОТАЮЩИХ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

Исследовано влияние регулярного микрорельефа, образованного поверхностями трения с твердопленочным покрытием на основе дисульфида молибдена, на адгезию покрытия к подложке и коэффициент трения и износостойкость пар трения приборов, работающих в вакууме при высокой температуре. Показано, что вибронакатывание поверхностей трения с твердопленочным покрытием при образовании регулярного микрорельефа увеличивает адгезию покрытия к подложке в несколько раз и позволяет контролировать качество покрытия.

**Ключевые слова:** пара трения, регулярный микрорельеф, коэффициент трения, твердопленочное покрытие, адгезия, вакуум, температура.

Постоянная тенденция к совершенствованию техники и расширение круга решаемых ею функциональных задач вынуждают повышать показатели качества исполнительных механизмов приборов и устройств. Особенно это относится к механизмам используемых в особых (нередко в экстремальных) условиях приборов. Одним из важнейших узлов механических устройств являются пары трения, от работы которых в значительной степени зависят основные параметры качества механизма в целом. В условиях высокой температуры и вакуума для снижения коэффициента трения используют твердые смазки, которые наносят на трущиеся поверхности при изготовлении сопрягающихся деталей. При этом необходимо создавать такие поверхности, которые достаточно прочно удерживают

твердосмазочные покрытия и которые должны быть „несущеспособными“, не иметь отдельных иррегулярных выступов малого радиуса, а также их поверхности должны быть технологически воспроизводимыми.

До настоящего времени подготовка поверхностей деталей (работающих в условиях вакуума и высокой температуры) для покрытия (к примеру, покрытия, изготовленного на основе дисульфида молибдена) проводилась шлифованием с их последующей пескоструйной обработкой для создания определенного класса шероховатости [1]. Радиус выступов при этом обычно составлял порядка 10 мкм. Снижение высоты выступов микрорельефов поверхности (уменьшение шероховатости) приводит к отрицательным результатам – уменьшается адгезия покрытия к подложке. Необходимыми эксплуатационными свойствами может обладать только поверхность с регулярным микрорельефом, представляющим собой совокупность регулярных выступов, к примеру, радиусом 4000—10 000 мкм. Для исследования был выбран регулярный микрорельеф сетчатого типа как наиболее легко рассчитываемый и технологически воспроизводимый [2].

Для воспроизведения способа образования регулярного микрорельефа разработано устройство — виброголовка [3], позволяющая получать регулярный микрорельеф с расчетными параметрами. При определении режимов образования регулярного микрорельефа с заданными параметрами использовалась методика, которая описана в работах [4, 5].

Для проверки адгезии покрытия к подложке испытания проводились на вибростенде. Далее по результатам взвешивания образца до и после испытаний определялась величина „сыпаяемости“ покрытия, которая сравнивалась с подобной величиной у образцов, изготовленных по существующей технологии (с нанесением антифрикционного слоя на шлифованную и пескоструйно обработанную поверхность). Испытания показали, что „сыпаяемость“ покрытия у образцов с твердосмазочным покрытием, обладающих регулярным микрорельефом, уменьшилась в 25 раз по сравнению с остальными.

Для исследования влияния регулярного микрорельефа на коэффициент трения и износостойкость проводились фрикционные испытания на специальном стенде [6] при следующих режимах: вакуум —  $10^{-6}$  мм рт.ст., температура в камере стенда —  $+650$  °С, частота вращения шпинделя — 600 об/мин, осевая нагрузка — 0—2 Н, длительность испытаний — 1, 10, 20 часов. В качестве образцов были выбраны втулки с коэффициентом перекрытия 1,0. Контакт втулок по торцам дает самые „жесткие“ условия эксперимента и позволяет наиболее быстро оценить испытываемую пару трения.

С помощью регистрирующих приборов производилась запись момента трения, возникающего при вращении подвижного образца относительно неподвижного. После обработки записанной диаграммы момента трения можно получить зависимость коэффициента трения от времени.

Износ образцов определялся путем их взвешивания с точностью до  $5 \cdot 10^{-5}$  грамма по формуле:  $\Delta = P - P_k$ , где  $P$  и  $P_k$  — вес образца до и после испытаний (в граммах). При испытаниях наблюдался перенос материала с одного образца на другой.

Для сопоставления результатов по износостойкости материала, полученных при использовании различных схем испытаний, определялась такая характеристика, как „путь трения“:

$$L = \pi D n T,$$

где  $D$  — средний диаметр образца,  $n$  — скорость вращения подвижного образца,  $T$  — время испытаний (мин). Для данной установки:  $D = 0,024$  м,  $n = 1000$  об/мин, путь трения при испытаниях в течение одного часа —  $L = \pi \cdot 0,024 \cdot 1000 \cdot 60 = 4524$  м; десяти — 45 238 м; двадцати — 90 475 м.

Образцы в различных сочетаниях испытывали, нанося покрытие в разных вариантах с обработкой вибронакатыванием в два этапа в течение одного часа. На первом этапе испытанный контртелом служил образец без покрытия с поверхностью после шлифовки (с нерегулярной шероховатостью). На втором испытывались образцы с регулярной шероховатостью (вибронакатанные и с покрытием). Анализ результатов испытаний, проводившихся в течение 1 ч, позволил установить, что:

1) образцы с нерегулярным микрорельефом (только шлифованные), в вакууме работать не способны, так как коэффициент трения близок к 1,0;

2) образцы, упрочненные регулярным микрорельефом, способны работать в вакууме и при высокой температуре (коэффициент трения — 0,7—0,8);

3) создание регулярного микрорельефа на поверхности перед нанесением твердосмазочного покрытия обеспечивает оптимальную шероховатость для удержания покрытия, но коэффициент трения остается достаточно высоким — 0,38—0,58;

4) низкие значения коэффициента трения (0,06—0,08) наблюдаются при нанесении твердосмазочного покрытия, изготовленного на основе дисульфида молибдена, на обе рабочие поверхности и вибронакатывании одной из них с созданием регулярного микрорельефа.

По результатам испытаний были отобраны несколько пар, в дальнейшем испытания продолжались в течение 10 ч. За основу была взята пара, показавшая наименьший стабильный коэффициент трения при испытаниях в течение каждого часа (4). Для сравнения испытывались также пары с образцами, где покрытие наносилось на одну или обе трущиеся поверхности образцов после шлифования — поверхности с нерегулярным микрорельефом. Испытания продолжались 10 ч, они показали, что:

— при нанесении твердосмазочного покрытия только на одну из трущихся поверхностей с последующим вибронакатыванием коэффициент трения непрерывно растет и через 7 ч достигает значения 0,7;

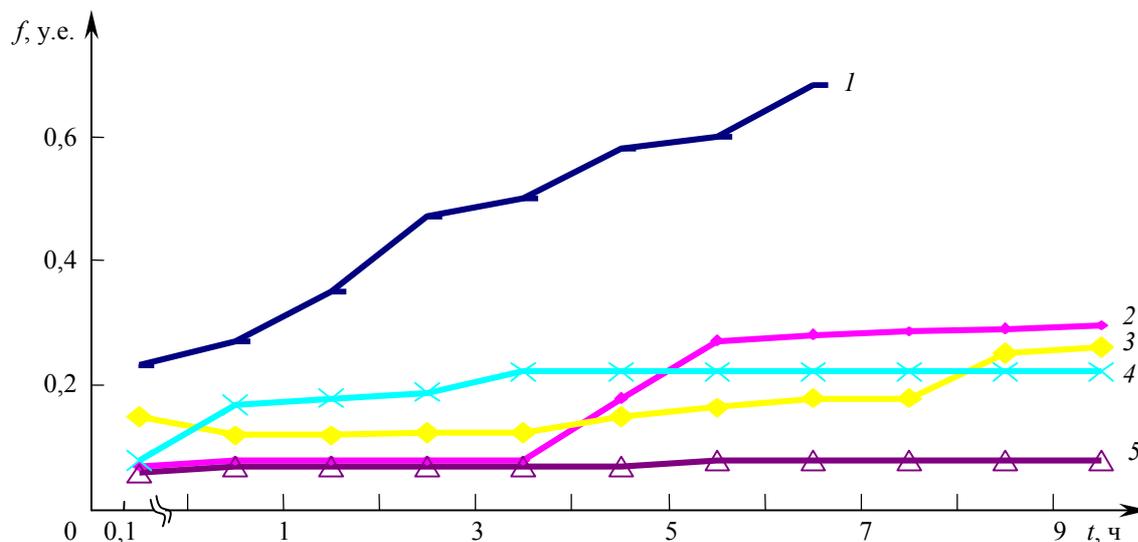
— пленки твердых смазок, изготовленных на основе дисульфида молибдена, обладают хорошими противоизносными и антифрикционными свойствами в течение 4 часов работы (однако по мере увеличения продолжительности испытания вследствие полного истирания покрытия и контакта поверхностей с нерегулярным микрорельефом коэффициент трения увеличивается до 0,28 для одностороннего покрытия и 0,22 — для двустороннего);

— создание регулярного микрорельефа хотя бы на одной из трущихся поверхностей с твердосмазочным покрытием обеспечивает низкий (0,06—0,08) коэффициент трения.

Для подтверждения факта повышения износостойкости твердосмазочного покрытия при регуляризации поверхности трения были проведены натурные испытания. Использовались подшипниковые цилиндрические и сферические втулки, изготовленные из материала ЭИ-828 и покрытые твердопленочной смазкой на основе дисульфида молибдена (ВНИИ НП-229). Одну из контактирующих поверхностей пары трения подвергали вибронакатыванию для создания на ней регулярного микрорельефа. Испытания подтвердили факт повышения износостойкости — запланированный ресурс был превышен в шесть раз.

Рассмотренный и исследованный в настоящей работе подход к обеспечению эксплуатационных свойств пар трения приборов, работающих в экстремальных условиях, позволил создать пару трения с прочным покрытием, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. Изготовленные по вышеизложенному способу около 100 подшипников скольжения проработали свыше 1000 часов в вакууме при высокой температуре и ни в одном случае не показали отслоения покрытия, а износостойкость возросла в шесть раз.

В качестве иллюстрации на рисунке приводятся экспериментальные зависимости влияния регулярности микрорельефа поверхности трения на износостойкость ( $f$  — коэффициент трения).



Здесь кривые соответствуют следующим парам трения: 1 — образец после шлифовки—образец с покрытием вибронакатанный, 2 — образец после шлифовки—образец с покрытием, 3 — образец с покрытием—образец с покрытием, 4 — образец после вибронакатывания—образец с покрытием, 5 — образец с покрытием—образец с покрытием вибронакатанный.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В. и др. Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
2. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 321 с.
3. А.с. № 1220243 СССР, МКИ В 24 В 39/04. Устройство для нанесения регулярного микрорельефа / И. Р. Цимбал, И. Н. Дмитриева, Ю. Г. Шнейдер. Заявл. 02.04.84, опубл. 29.02.88.
4. Кузьмин Ю. П. Разработка и исследование аппаратуры для контроля микрогеометрии поверхностей с регулярным микрорельефом. Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1982.
5. Шнейдер Ю. Г. Холодная бесштамповая обработка металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1967. 270 с.
6. А.с. № 1021993 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Машина трения / И. Р. Цимбал, Л. А. Чатынян, Т. А. Соловьева. Заявл. 04.11.81, опубл. 07.06.83.

#### Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения
- Игорь Романович Цимбал** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; ведущий инженер-технолог

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

С. А. ЯКОВЛЕВА, О. С. ЮЛЬМЕТОВА

## РАЗМЕРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Рассмотрены причины возникновения размерной нестабильности материалов и конструкций приборов, а также физические механизмы ее проявления. Представлен расчетно-экспериментальный метод оценки размерной нестабильности сборочных конструкций и отмечена актуальность его применения при создании высокоточных приборов.

*Ключевые слова:* геометрическая стабильность, сопротивление микропластическим деформациям, микроползучесть.

Способность металлических материалов и изделий к самопроизвольному изменению формы и размеров с течением времени является значительным препятствием на пути обеспечения непрерывно возрастающих требований к точности и надежности приборов. Так, к деталям и узлам приборов навигационных комплексов предъявляются чрезвычайно жесткие требования по их геометрической точности: отклонение линейных размеров по 5—6 квалитетам и с более высокой точностью, отклонение взаимного расположения и формы поверхностей — доли угловой секунды или десятые, сотые доли микрометра [1]. При этом требования к постоянству размеров и формы еще более высоки и должны обеспечиваться при длительной эксплуатации в условиях постоянной и переменной температуры, так как нестабильность геометрии высокоточных деталей и узлов непосредственно влияет на погрешность прибора.

Обеспечение указанных требований является достаточно сложной задачей, решение которой связано с необходимостью использования металлических материалов с высоким постоянством их качества, необходимостью применения специальных методов и технологических процессов стабилизирующей обработки при изготовлении изделий [2].

Самопроизвольное изменение размеров металлических изделий является следствием в основном трех факторов [3]:

- 1) нестабильности фазового и структурного состояния материала;
- 2) релаксации остаточных внутренних напряжений, возникающих в деталях в процессе различных технологических операций горячей и холодной обработки, а также при механо-сборочных операциях и в процессе длительного хранения;
- 3) микроползучести под действием внешних нагрузок.

Влияние любого фактора (факторов) может оказаться преобладающим в зависимости от конкретных условий, например, материала, его структурного состояния и рабочих напряжений. Особенно интенсивно процессы микроползучести и релаксации развиваются в сплавах с метастабильным фазовым и структурным состоянием. В условиях эксплуатации высокоточных приборов наблюдается процесс медленного и непрерывного нарастания пластической деформации при снижающихся во времени внутренних напряжениях в материале, значительно меньших предела текучести. Чем больше сопротивление материала микропластическим деформациям во времени, тем выше его размерная стабильность в условиях эксплуатации и длительного хранения. Поэтому основной функцией применяемых при изготовлении деталей приборов стабилизирующих обработок является повышение сопротивления материала изделий микропластическим деформациям.

Показатели сопротивления микропластическим деформациям металлов и сплавов не коррелируют с условным пределом текучести, который используется в традиционных методах расчета конструкций с назначением запаса прочности. Для высокого сопротивления

микропластическим деформациям при кратковременном и длительном нагружении необходимо обеспечить как можно более высокие напряжения начала движений дислокаций и стабильность фазового состояния, в то время как для достижения только высоких прочностных свойств эти факторы не существенны.

В основу методов повышения сопротивления металлов и сплавов микропластическим деформациям положены принципы создания препятствий движению дислокаций, обеспечения стабильности структурного состояния в условиях эксплуатации и понижения остаточных внутренних напряжений. Но максимально возможное снижение остаточных внутренних напряжений за счет термической обработки не решает проблемы обеспечения постоянства размеров изделий во времени, поскольку зачастую приводит к снижению сопротивления микропластическим деформациям материала.

Действующие нормативные материалы, такие как ГОСТ 17537-75 и ОСТ4.ГО 054103 на стабилизацию размеров термической обработкой, имеют определенные недостатки [3]:

- представлены только термические методы стабилизации;
- отсутствует ряд новых материалов, применяемых в навигационной технике;
- эффективность представленных режимов ограничена (как показывает практика);
- отсутствуют сведения о стабилизации сварных узлов и методах оценки стабильности сборок.

Нахождение оптимального решения практических задач выбора, разработки и применения материалов и технологий для высокоточных изделий возможно в результате дальнейших обстоятельных исследований зависимости характеристик размерной стабильности от строения малоизученных металлов и сплавов, а также разработки методов оценки стабильности высокоточных деталей и сборок.

Для оценки размерной стабильности сложных гироскопических сборок был предложен метод, основанный на расчетно-экспериментальном подходе [1].

Размерную нестабильность сборочной конструкции  $\varepsilon$  можно представить как сумму нестабильностей ненагруженных (см. далее формулу (1)) и нагруженных (4) при сборке и эксплуатации деталей, нестабильностей ненагруженных неразъемных (2) и разъемных (3) соединений узлов, а также нестабильностей неразъемных соединений, нагруженных при сборке и эксплуатации (5).

Нестабильность ненагруженных деталей складывается из структурной нестабильности материала и нестабильности, вызванной релаксацией остаточных напряжений, возникающих в результате различных технологических воздействий:

$$\varepsilon_{\text{д}} = \sum_{i=1}^m (\varepsilon_{\text{с}i} + \varepsilon_{\text{р}i}), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{с}}$  — структурная нестабильность;  $\varepsilon_{\text{р}}$  — нестабильность, вызванная релаксацией остаточных напряжений;  $m$  — количество деталей в сборке ( $i = \overline{1, m}$ ).

Нестабильность ненагруженных неразъемных соединений складывается из структурной нестабильности материалов швов (сварных, паяных, клееных) и деформации, вызванной релаксацией остаточных напряжений:

$$\varepsilon_{\text{ш}} = \sum_{j=1}^n (\varepsilon_{\text{с}j} + \varepsilon_{\text{р}j}), \quad (2)$$

где  $n$  — число неразъемных соединений ( $j = \overline{1, n}$ ).

Нестабильность ненагруженных разъемных соединений определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{к}} = \sum_{j=1}^{m-n-1} \varepsilon_j, \quad (3)$$

где  $m-n-1$  — число разъемных соединений ( $j=\overline{1, m-n-1}$ ),  $\varepsilon_j$  — нестабильность, вызванная деформацией в контактных поверхностях соединения.

Деформации в контакте зависят от шероховатости и загрязнений поверхности. При небольшой шероховатости, хорошей очистке деталей и чистовых условиях сборки такие деформации даже в течение длительного времени не превысят сотых долей микрометра на одну пару контактных поверхностей, и часто ими можно пренебречь.

Нестабильность нагруженных в сборке деталей (4) и швов (5), подвергнутых воздействию внутренних напряжений от сборочного крепежа и посадок с натягом, а также внешних эксплуатационных (транспортных) напряжений, можно определить по следующим формулам:

$$\varepsilon_{нд} = \sum_{i=1}^{m_p} \varepsilon_{pi} + \sum_{l=1}^{m_{\Pi}} \varepsilon_{\Pi l}, \quad (4)$$

где  $m_p$  — количество деталей, подвергнутых релаксации внутренних напряжений ( $i=\overline{1, m_p}$ );  $m_{\Pi}$  — количество деталей, подвергнутых микроползучести под действием внешних напряжений ( $l=\overline{1, m_{\Pi}}$ );  $\varepsilon_{\Pi}$  — нестабильность, вызванная микроползучестью детали:

$$\varepsilon_{нш} = \sum_{j=1}^{n_p} \varepsilon_{pj} + \sum_{l=1}^{n_{\Pi}} \varepsilon_{\Pi l}, \quad (5)$$

где  $n_p$  — количество швов, подвергнутых релаксации ( $j=\overline{1, n_p}$ );  $n_{\Pi}$  — количество швов, подвергнутых микроползучести ( $l=\overline{1, n_{\Pi}}$ ).

Представление нестабильности в виде отдельных составляющих позволяет применять экспериментально-расчетный метод ее поэтапной оценки для сложных высокоточных приборныхборок. Метод предполагает знание целого ряда механических характеристик входящих в изделие материалов и предусматривает поэтапный анализ стабильности с движением от простого объекта к более сложному: материалы, соединения, отдельные детали, узлы, прибор в целом. При этом учитываются только те элементы конструкции, которые входят в размерную цепь с замыкающим звеном, определяющим точность прибора.

Расчеты высокостабильных конструкций традиционными методами сопротивления материалов и теории упругости неэффективны, так как размерная нестабильность проявляется даже в отсутствие внешних механических воздействий и увеличивается при их наличии, а также под воздействием физических полей. Поэтому анализ размерной нестабильности конструкций включает экспериментальное определение характеристик нестабильности с применением специальных моделей, дополняемое расчетами. На каждом из этапов методика предусматривает решение специфических задач, но и содержит некоторые общие требования. Так, общим является требование иметь на образцах, моделях и деталях базовые измерительные поверхности, максимально приближать форму моделей и технологию их изготовления к реальной конструкции, заканчивать каждый этап при необходимости корректировкой конструкции и технологии, обеспечивая наивысшую размерную стабильность исследуемого объекта.

Данный метод был апробирован [1] при оценке стабильности малогабаритного гироскопа с магнитным подвесом, в котором замыкающим звеном, определяющим точность прибора, является величина отклонения от перпендикуляра оси датчика момента к базовой посадочной поверхности наружного корпуса прибора. В результате были заменены материалы некоторых деталей, выбраны оптимальные виды стабилизирующей обработки и технологические схемы изготовления деталей и узлов, что значительно повысило размерную

стабильность конструкции, таким образом долговременная нестабильность перпендикулярности оси датчика к базовой поверхности, изготовленного с применением предложенной методики, может принимать значения в пределах 1,2—15".

В дальнейшем планируется применить данный расчетно-экспериментальный метод оценки размерной нестабильности к высокоточным узлам гироскопических приборов, разрабатываемым в ЦНИИ „Электроприбор“.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-00158а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврюсов В. И. Метод оценки размерной нестабильности замыкающего звена гироскопических сборок // Гироскопия и навигация. 1993. № 1. С. 18—25.
2. Хенкин М. Л., Локшин И. Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1974. 256 с.
3. Гаврюсов В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. Л.: ЦНИИ „Румб“, 1990. 113 с.
4. Гаврюсов В. И. Геометрическая стабильность металлических приборных конструкций и технологические методы ее повышения. Л.: ЦНИИ „Румб“, 1981. 146 с.

#### Сведения об авторах

- Светлана Анатольевна Яковлева** — ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; инженер-технолог 1-й категории; E-mail: yorkunoi@gmail.com
- Ольга Сергеевна Юльметова** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; ассистент; E-mail: www.ralli@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

УДК 621.77

М. А. ГОЛУБЧИКОВ, Ю. П. КУЗЬМИН

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРОНАКАТЫВАНИЯ

Рассматривается процесс получения регулярного микрорельефа с применением методов компьютерного моделирования. Представлена программа АСОРМР для расчета параметров вибронакатывания и графического отображения траектории движения инструмента.

**Ключевые слова:** вибронакатывание, моделирование.

Новое направление в теории микрогеометрии поверхностей — регуляризация микрорельефа — было предложено профессором ЛИТМО Ю. Г. Шнейдером, который разработал научные основы создания и внедрения новых, основанных на поверхностном пластическом деформировании (ППД), простых в использовании способов и технологий образования на технических поверхностях регулярных микрорельефов (РМР) вместо шероховатости методом вибрационного накатывания.

Сущность метода вибронакатывания заключается в том, что на рабочих поверхностях деталей машин и приборов вместо шероховатости, образующейся в результате их обработки традиционным способом — резанием, создаются микрорельефы с неровностями практически одинаковой формы и размеров со строго заданным конструктором взаимным располо-

жением. Таким образом, использование этого метода позволяет повысить надежность и ресурсы машин и приборов [1]. Основной особенностью (и достоинством) метода вибронакатывания является то, что варьирование вида регулярного микрорельефа и его параметров происходит не за счет использования сменных трафаретов и сложных копирных устройств, а за счет изменения соотношения скорости движения заготовки и деформирующего элемента.

Регулярность микрорельефа достигается тонким пластическим деформированием поверхностных слоев обрабатываемого материала шарами или алмазными наконечниками с усложнением кинематики за счет осцилляционного движения деформирующего элемента. На обработанной поверхности РМР создаются одинаковые по форме, размеру и взаимному расположению микронеровности. Это позволяет не только аналитически рассчитывать значения всех параметров как функцию режима вибронакатывания, но и устанавливать оптимальный вид регулярного РМР и значения его высотных, шаговых и площадных параметров, обеспечивая требуемые эксплуатационные свойства: износостойкость, устойчивость к задирам, гидроплотность, усталостную прочность, триботехнические характеристики [1]. В результате обобщения исследований и опыта использования разработок в промышленности был создан новый государственный стандарт на микрогеометрию технических поверхностей — ГОСТ 24773-81 [2].

В последние годы идет активное развитие и внедрение в производство высокоточного оборудования с числовым программным управлением. Применение современных станков невозможно без использования соответствующей программной базы. Для возможности выполнения технологической операции вибронакатывания на станке с ЧПУ была создана программа АСОРМР, позволяющая получать и передавать параметры процесса вибронакатывания в систему станка.

Согласно ГОСТ 24773-81, регулярный микрорельеф может быть как частично (рис. 1, а), так и полностью регулярным (рис. 1, б), и определяться рядом параметров.

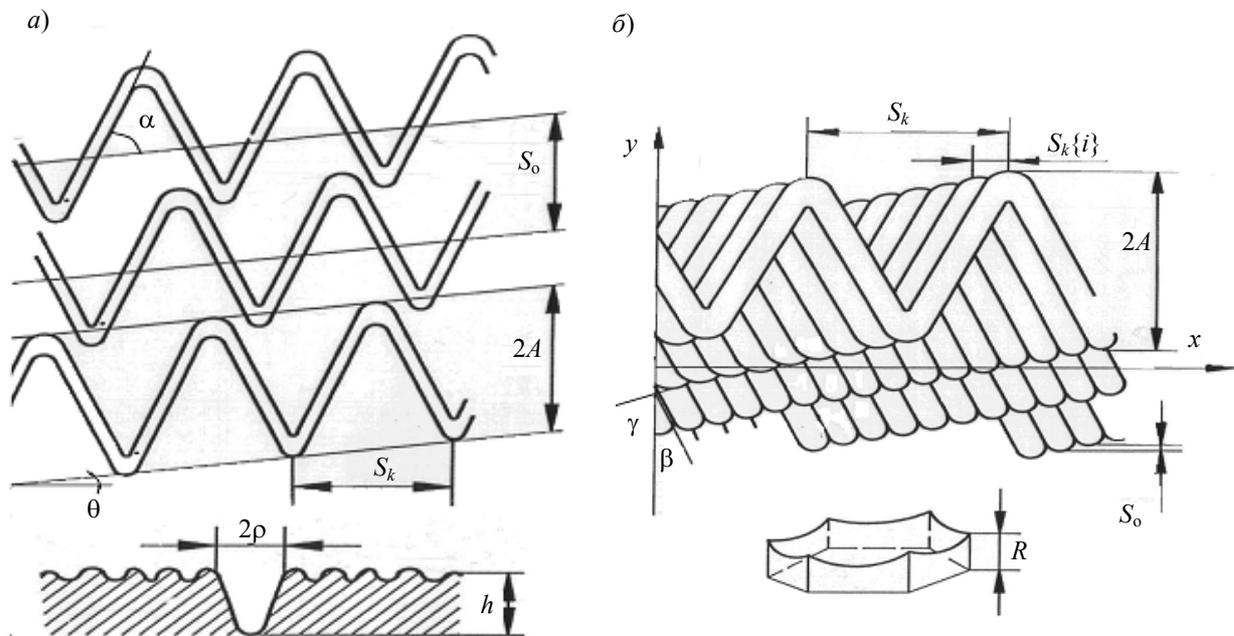


Рис. 1

Как следует из рис. 1, вид регулярного микрорельефа определяется следующими параметрами: амплитудой осциллирующего движения инструмента —  $A$ ; осевым шагом неровностей —  $S_o$ , который численно равен подаче инструмента при обработке; круговым шагом неровностей —  $S_k$ ; шириной канавки —  $2p$  и отношением числа оборотов заготовки к числу

двойных ходов инструмента —  $i$ , которое состоит из целой  $[i]$  и дробной части отношения  $\{i\}$ . При значении подачи меньше ширины канавки  $2\rho$  образуется полностью регулярный микро-рельеф с числом элементов  $N$  (на рис. 1 не указано) на единицу поверхности, высотой элемента —  $R$  и углами направления расположения элемента —  $\beta, \gamma$ . В программе АСОРМР технологю предоставляется возможность использовать как стандартный метод расчета, так и микрогеометрический.

Технологически заданный РМР обеспечивается расчетом, поскольку между значениями его параметров и режимами вибронакатывания существуют и уже установлены аналитические зависимости, а для большого числа экспериментально выявленных рациональных параметров режима вибронакатывания определены значения характеристик поверхности с целью обеспечения различных эксплуатационных свойств деталей и соединений.

Исходя из вышесказанного следует отметить, что программа АСОРМР позволяет автоматически рассчитывать недостающие параметры (рис. 2).

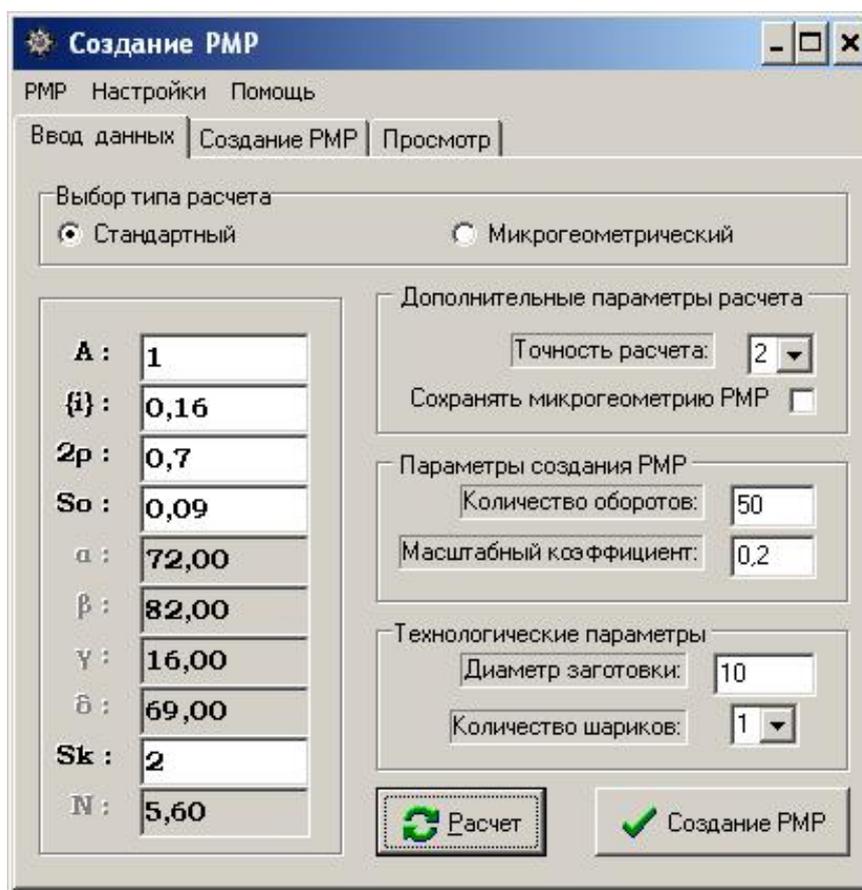


Рис. 2

Для того чтобы окончательно смоделировать микро-рельеф, необходимо задать количество оборотов заготовки и диаметр заготовки. Также можно регулировать масштаб изображения микро-рельефа с помощью масштабного коэффициента.

Следующим этапом создания управляющей программы является графическое отображение траектории движения инструмента (рис. 3).

Для передачи полученной траектории на станок программа создает текстовый файл с расширением `.txt`, что позволяет использовать его в большинстве известных типов станков.

Необходимо отметить, что существенное влияние на микро-рельеф оказывает значение дробного остатка периода колебаний за один оборот заготовки  $\{i\}$ . Незначительное измене-

ние данного параметра существенно влияет на рисунок микрорельефа, что приводит к необходимости постоянного контроля траектории и как следствие — к увеличению времени обработки.

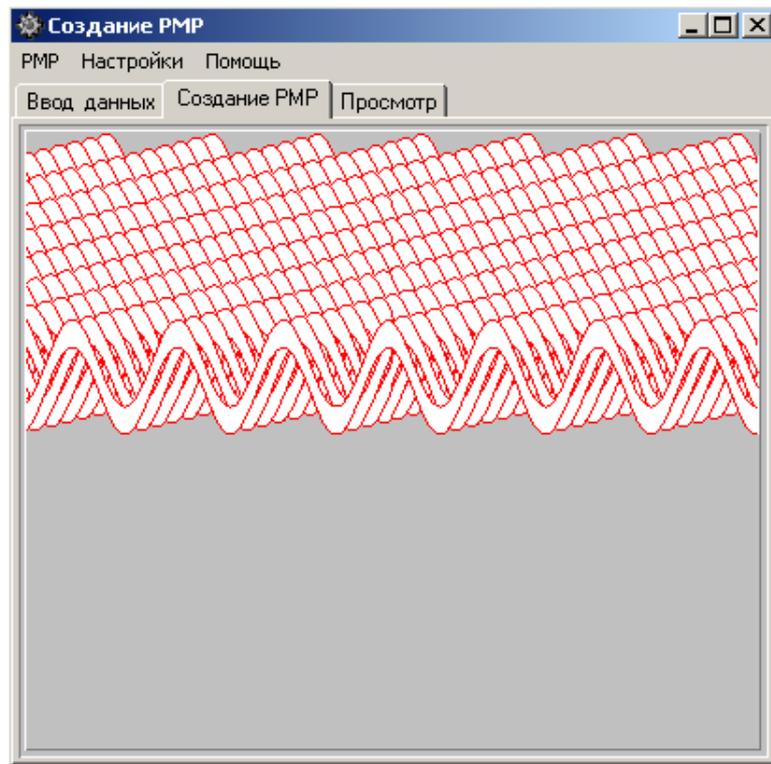


Рис. 3

Из сказанного выше можно сделать заключение об актуальности управляемого образования РМР на рабочих поверхностях деталей, необходимости создания научных основ регуляризации микрогеометрии, параметров РМР и режима их образования; о необходимости разработки простых, надежных способов образования РМР, средств технологического оснащения, позволяющих обеспечить улучшенные свойства деталей, энергоресурсосбережение и экологическую чистоту производства; создания надежного метрологического обеспечения для производственного использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л., 1972.
2. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики. 01.07.1982.

**Максим Александрович Голубчиков**

**Сведения об авторах**

— аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения

**Юрий Петрович Кузьмин**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

С. Д. ВАСИЛЬКОВ, С. А. ТАЛЬНИШНИХ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ РЕЗИСТИВНЫМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ**

Исследована связь механических и электрических характеристик с целью определения остаточных напряжений в металлах при различных видах механической обработки. Измерения проводились неразрушающим резистивным электроконтактным методом, а также разрушающим методом травления. Показана возможность определения остаточных напряжений в образцах при использовании различных технологий обработки их поверхности с помощью удельного электросопротивления.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, механическая обработка, качество поверхностного слоя, неразрушающий контроль.

Существует связь между значением удельной электрической проводимости и величиной механических напряжений [1] металла, воздействию которых он подвергается.

При отсутствии механических напряжений в металле значение периода кристаллической решетки соответствует номинальному значению удельной электрической проводимости  $\gamma_0$ . Под действием механических напряжений  $\Delta\sigma$  может происходить изменение геометрии кристаллической решетки металла. В зоне упругих деформаций такое изменение считается пропорциональным механическому напряжению, а изменения электропроводности  $\Delta\gamma$  — также пропорциональными механическим напряжениям  $\Delta\sigma$ :

$$\Delta\gamma = K_\sigma \Delta\sigma, \quad (1)$$

где  $K_\sigma$  — экспериментально получаемый коэффициент пропорциональности, который характеризует свойства металла.

Таким образом, измеряя электрические свойства металла, можно определять механические напряжения в нем.

Для определения удельного сопротивления материала по глубине используется явление скин-эффекта [2], при котором глубина проникновения тока составляет

$$h = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \gamma}}, \quad (2)$$

где  $\pi = 3,1415$ ;  $f$  — частота тока;  $\mu$  — магнитная проницаемость материала;  $\gamma$  — его удельная электропроводность.

На глубине  $h$  значение плотности тока падает в  $e = 2,71$  раз относительно значения на поверхности. Явление скин-эффекта позволяет послойно исследовать проводящее изделие путем подачи в него электрического тока различной частоты и измерения откликов сигнала, параметры которого связаны с изменением напряженно-деформированного состояния изделия.

Рассмотрим процессы, происходящие в поверхностном слое металла. Через участок плоского проводника протекает ток  $I$  от какого-либо внешнего устройства. Сопротивление  $R$  такого проводника при постоянном токе выражается формулой

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала проводника,  $l$  и  $S$  — соответственно длина проводника и площадь его сечения;  $S = bh$ ,  $b$  — ширина проводника. Сопротивление проводника  $R = U/I$ , где  $U$  — падение напряжения на нем. Измерив  $U$  и  $I$  и определив значение  $R$ , при известных размерах  $l$ ,  $b$  и  $h$  можно вычислить значение  $\rho$ .

Введем понятие эффективного удельного электрического сопротивления (ЭУС) изделия

$$\rho_3 = \rho \frac{l}{b}. \quad (3)$$

Значение ЭУС зависит от частоты тока и материала изделия, его можно измерять при разных частотах  $f_i$  ( $i=1-9$ ) так же, как и при постоянном токе:

$$\rho_{3i} = \frac{U_i h_i}{I_i}. \quad (4)$$

Вычислив распределение  $\rho_3$  по глубине изделия, получим информацию как об изменении удельного сопротивления  $\rho$  поверхностного слоя изделия, зависящего от изменений механических напряжений  $\sigma$  по его глубине, так и об изменении сечения проводника. Изменение значений  $\rho_3$  связано с изменением сечения проводника, а изменение  $\Delta\rho_3$  связано с механическими напряжениями. При этом значения  $\Delta\rho_3$  примерно на 1—2 порядка ниже, чем  $\rho_3$ .

Требуется получить калибровочную зависимость между ЭУС и механическими напряжениями материала исследуемого изделия на глубинах, соответствующих заданным частотам. Для этого можно применить разрушающий метод Давиденкова—Биргера [3], в соответствии с которым для образцов из материала исследуемого изделия строится распределение механических напряжений по глубинам (эпюра напряжений), соответствующим частотам электрических измерений. В результате получим калибровочный график между ЭУС и механическими напряжениями в материале изделия. При последующих исследованиях изделий из того же материала полученная зависимость используется для преобразования данных электрических измерений в эпюру механических напряжений.

На рис. 1 приведен типичный график зависимости  $\rho_3$  от частоты для образца из сплава ЭП-866. В соответствии с зависимостью (2) между частотой и глубиной проникновения тока в проводник эта же кривая является графиком распределения ЭУС по глубине. Полученные данные были использованы для построения зависимости изменений ЭУС  $\Delta\rho_3 = \rho_3 - \rho_{30}$  ( $\rho_{30}$  — номинальное значение ЭУС), приведенной на рис. 2, где также показаны аналогичные зависимости  $\Delta\rho_3$  для различных технологий обработки поверхности образцов из того же сплава (образец А: 1 — с полированной поверхностью; 2 — с нагартованной поверхностью; образец Б: 3 — с нагартованной поверхностью; 4 — с поверхностью после штамповки), а также кривая 5 — для нагруженной балки из этого сплава с напряжением  $\sigma = 200$  МПа.

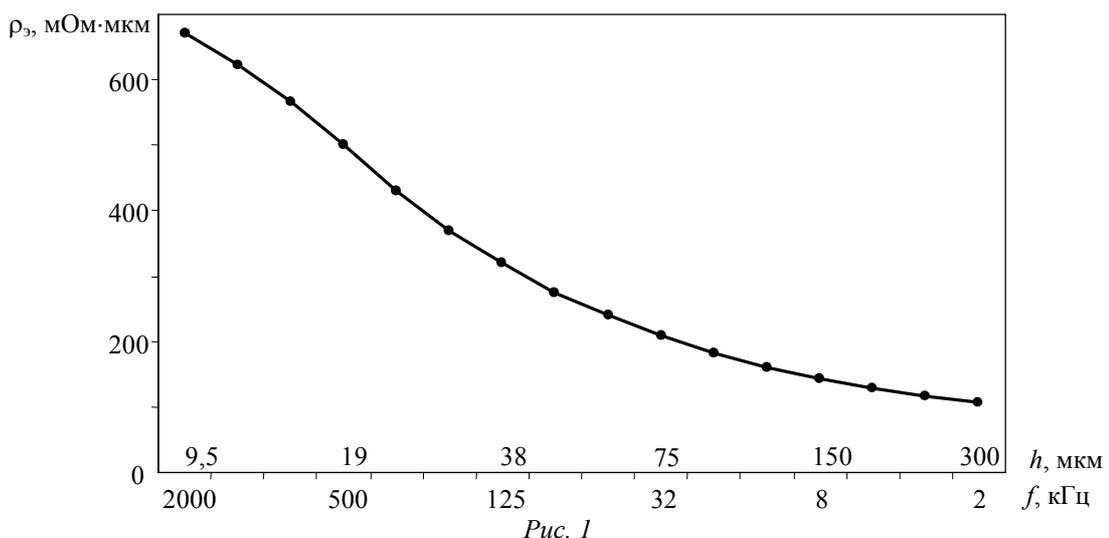


Рис. 1

Измерения на балке с известной степенью ее нагружения показали масштаб значений остаточных напряжений в образцах, подвергнутых разным видам обработки поверхности. Вид кривых  $\Delta\rho_3$  для образцов обработки поверхностей (полировка, нагартовка и штамповка на двух гранях плоских образцов А и Б) хорошо соответствует принятым представлениям о

механических напряжениях, создаваемых при использовании этих технологий. При этом снижение значения  $\Delta\rho_3$  указывает на наличие напряжений растяжений ( $\sigma^+$ ), а повышение — на наличие напряжений сжатия ( $\sigma^-$ ).

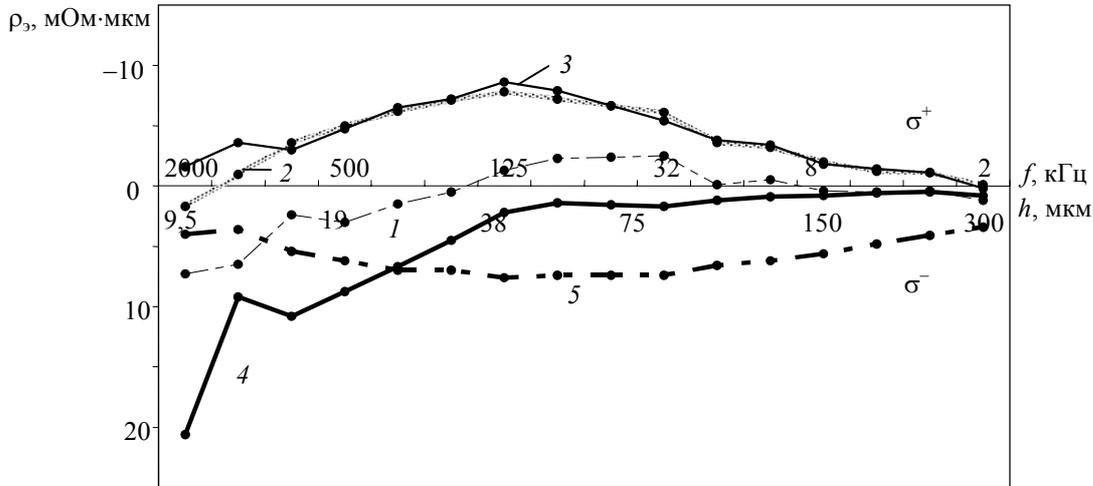
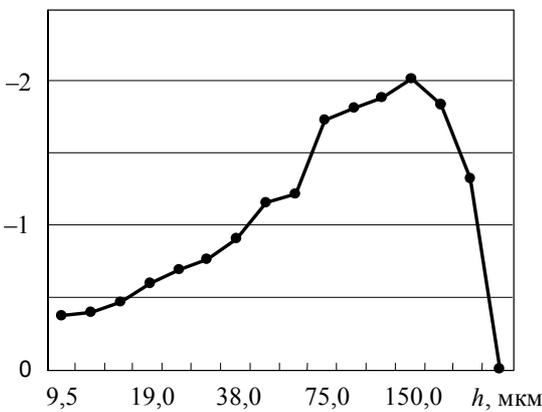


Рис. 2

На рис. 3 приведен пример поэтапной работы устройства для определения механических напряжений в турбинной лопатке: *а* — кривая калибровочных коэффициентов  $K_i^\sigma$ ; *б* — вычисленная эпюра остаточных напряжений  $\sigma(h)$ , полученная вышеописанным способом, точки — результат разрушающего контроля. Сравнимые результаты хорошо коррелируют друг с другом. Данные по предлагаемому способу получены примерно за 10 минут, а разрушающий метод требует около 4 часов работы [4].

а)

 $K_i^\sigma$ , МПа/МОм·мкм

б)

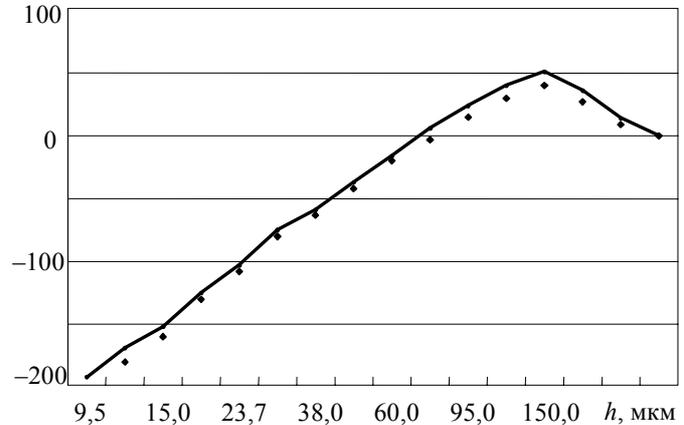
 $\sigma_i$ , МПа

Рис. 3

Таким образом, показана возможность определения остаточных напряжений с помощью измерения ЭУС, что подтверждается проведенными экспериментами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берестецкий В. Б., Лившиц Е. М., Пятаевский Л. П. Квантовая электродинамика // Теоретическая физика. М.: Наука, 1989. Т. 4.
2. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., 1976. С. 408—415.
3. Мрочек Ж. А., Макаревич С. С., Кожуро Л. М. и др. Остаточные напряжения: Учеб. пособие. Минск: УП „Технопринт“, 2003.

4. Васильков Д. В., Васильков С. Д., Иванов С. Ю. Новые подходы к оценке остаточного ресурса изделий по напряженному состоянию неразрушающим методом АФЧХ-тестирования // Физика, химия и механика трибосистем: Межвуз. сб. науч. тр. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2006. Вып. 5. С. 23—25.

***Сведения об авторах***

- Сергей Дмитриевич Васильков*** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; старший преподаватель; E-mail: vasilkovsd@mail.ru
- Сергей Андреевич Тальнишних*** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: miculi@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

---

---

# СБОРКА МИКРООБЪЕКТОВ

---

---

УДК 65.011.56:621.9

Б. С. ПАДУН, С. М. ЛАТЫЕВ

## ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ СБОРКИ МИКРООБЪЕКТОВ

Рассматривается процесс автоматизированной сборки микрообъективов, который основан на предварительном моделировании процесса этой сборки. Представлена концепция построения системы автоматизированной сборки. Описаны состав и структура интегрированной системы сборки, технологическая система и программные средства управления сборкой, а также проектирования виртуальной сборки.

*Ключевые слова:* технологическая система сборки, микрообъектив, автоматизация сборки, виртуальная сборка.

**Введение.** Требования к точности функционирования приборов, в частности микрообъективов (МО), постоянно возрастают, достичь ее за счет уменьшения погрешности изготовления деталей и узлов в некоторых случаях невозможно, поэтому необходимо искать новые пути обеспечения точности приборов. Один из путей — обеспечение функциональной точности при сборке прибора путем использования таких методов, как, например, селективная сборка, применение компенсаторов, коррекция элементов изделия. Характерное организационное отличие этих методов — зависимость операций сборки от операций формообразования.

Второй путь — обеспечение функциональной точности приборов за счет коррекции формообразующих операций. В этом случае организуется обратная связь между сборочной и формообразующими операциями, здесь можно выделить два метода: организация обратной связи во время изготовления конкретного изделия и организация обратной связи на основе предварительного прогноза изменения параметров оснащения. Первый метод получил название „адаптивно-селективная сборка“ (АСС) [1], второй назовем методом перспективного прогноза [2].

Следует отметить, что и первый, и второй путь предполагают использование дополнительных измерительных операций, которые могут выполняться до, во время и после сборки. В настоящей работе для достижения заданной точности при сборке МО выбран второй путь.

**Концепция построения системы сборки микрообъективов.** Основная идея концепции — это сборка МО по результатам виртуальной сборки, которая проводится с использованием математических моделей, описывающих функциональную точность МО [3]. Позволяет реализовать виртуальную сборку специальная программная система, задача которой определить из заданных множеств деталей и узлов МО те, которые могут обеспечить при совместной сборке требования по точности конкретного объектива. Следовательно, интегрируются технологическая система сборки (ТСС) и система автоматизированного проектирования виртуальной сборки (САПР ВС).

Нетрудно заметить, что ТСС должна содержать средства измерения деталей и узлов, от которых зависит функциональная точность МО, а для реализации и качественного обеспечения спроектированной виртуальной сборки целесообразно автоматизировать процесс сборки. Следует назвать еще несколько принципов проектирования ТСС:

1) линии сборки и склады рассматриваются как единая система. Сборочные действия на линии в общем случае не согласуются по времени их выполнения, поэтому для их синхронизации предусмотрена организация „разделяющих“ складов, в которых хранятся детали, узлы и собранные изделия;

2) прямоточность движения собираемого изделия на линиях;

3) замыкание линии и оперативная программная переадресация транспортных тележек (шаттлов). Это обеспечит выполнение операций на ТСС в любой последовательности;

4) возможность перехода без существенных потерь времени от сборки МО одного наименования к сборке МО другого наименования, основанная на унификации конструкций МО [4] и технологий их изготовления [5], что позволит обеспечить рабочие места типовой и групповой технологической оснасткой.

**Состав и структура интегрированной системы.** В соответствии с концепцией построения системы сборки в ней предусмотрено пять компонентов (рис. 1):

1) автоматизированная складская система, предназначенная для накопления, хранения и учета деталей, сборочных единиц и МО, а также синхронизации операций сборки и контроля. В состав складской системы входят мобильные склады ( $M_1$  и  $M_2$ ), подключенные к стационарному через порты приема (Р — подвижный робот, обслуживающий стационарный склад);

2) линия „измерений изделий и сборки узлов МО“. По результатам работы этой линии формируются базы данных об изделиях, в которых каждой измеряемой детали и узлу присвоено оригинальное имя, выполняется виртуальная сборка узлов и МО в целом, проектируются технологические процессы сборки и алгоритм управления линией сборки;

3) линия сборки МО (работает на основе результатов виртуальной сборки);

4) автоматизированная система управления (АСУ) ТСС;

5) САПР ВС, которая проектирует технологические процессы сборки и схемы эксплуатации оборудования.

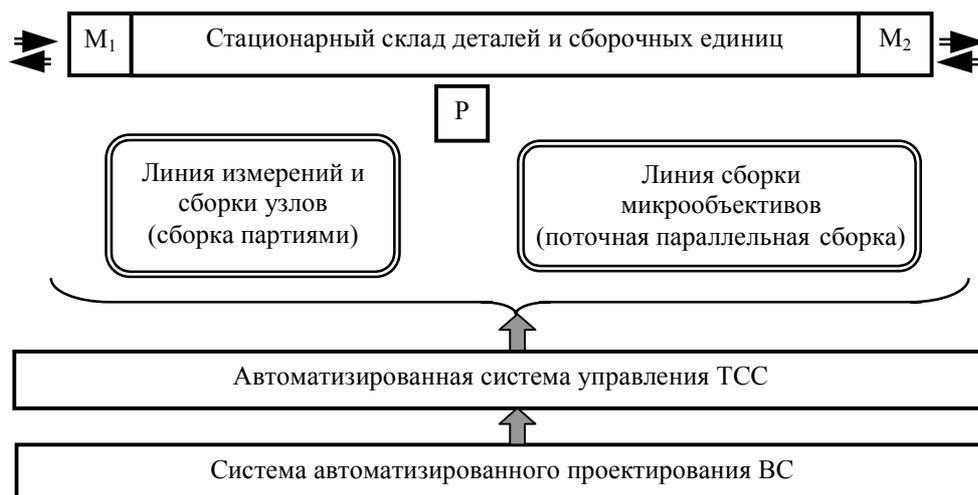


Рис. 1

На линии измерений деталей и сборки узлов МО параллельно выполняются сборочные операции. Предусмотрены три станции (рис. 2, а): комплектации и сборки (1), бесконтактного (2) и контактного измерения изделий (3). На линии сборки МО осуществляется поточная параллельная сборка, на ней предусмотрены пять станций (рис. 2, б): сборки стакана (4), контроля изображения (5), сборки корпуса (6), контроля высоты МО (7) и окончательной сборки

МО (8). Транспортная связь между зонами обеспечивается через стационарный склад. Мобильные склады позволяют обеспечить транспортную связь между цехами формообразования и сборочными линиями. Нетрудно заметить, что АСУ объединяет в единое целое все компоненты ТСС. Автоматизированная система управления информационно связывает ТСС с САПР ВС.

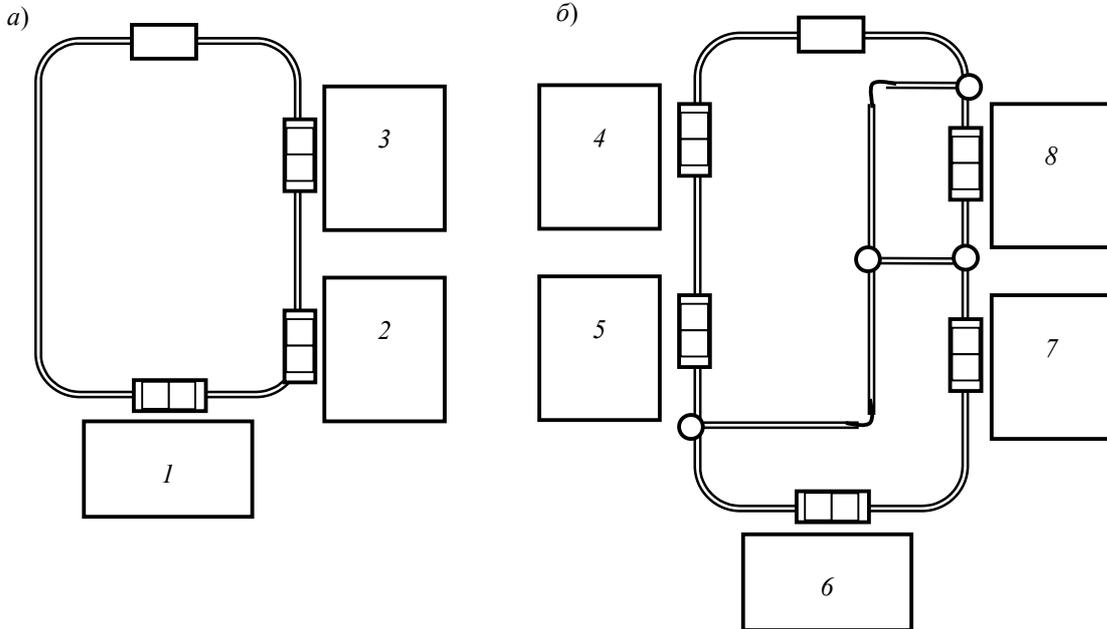


Рис. 2

**Алгоритм работы ТСС.** В системе можно выделить четыре основных типа транспортных потоков, если рассматривать склад (см. рис. 1) как начальную и конечную точки потоков:

1) измерительный — поток деталей или узлов, проходящий только через одну операцию измерения;

2) комплектации и измерений узла — поток сборки, проходящий через операции сборки и измерения. Данный поток определяет размещение станций на первой линии (рис. 2, а);

3) подготовительный — поток для заполнения буферных накопителей (лифтовых складов) на станциях тарами с деталями и узлами. Буферные накопители предназначены для того, чтобы создать страховочные (например, линзы, оправы, прокладные кольца) и технологические (например, сборочные единицы „линза в оправе“) запасы и обеспечить эффективную организацию контрольных операций;

4) потоки, проходящие через операции сборки МО. Эти потоки могут быть разветвляющимися вследствие неудовлетворительного результата контрольных операций (см. рис. 2, б).

Такое разделение транспортных потоков закладывается в базовый алгоритм работы ТСС: *измерение линз и оправ* → *комплектация, сборка и измерение узлов „линза в оправе“* → *измерение механических деталей* → *комплектация деталей в буферных накопителях* → *сборка МО*.

Измеренные детали и узлы накапливаются в стационарном складе до момента использования при сборке линзы. Данные об измерении деталей и узлов автоматически накапливаются в базе данных.

В реальной ситуации алгоритм сборки МО может иметь другой порядок действий либо может усложниться за счет организации параллельного измерения партий разных объектов или за счет совмещения во времени второго и первого потоков, либо упроститься за счет разделения во времени процессов комплектации и измерения узлов и т.п.

**Автоматизированная система управления ТСС** строится как четырехуровневая. Средствами управления первого уровня решаются задачи управления отдельными элемента-

ми ТСС, например, приводом робота, переключником, шаттлом и т.д. В средства управления отдельного элемента первого уровня включаются один или несколько контроллеров и одна или несколько типовых программных функций управления конкретным элементом ТСС. На данном уровне средства управления объединяют отдельные элементы.

На втором уровне средства управления координируют работу оборудования, выполняющего конкретную сборочную операцию, например, измерительную, складскую, сборки узла „линза в оправе“ и т.д. Каждая единица оборудования, функционирующая независимо и параллельно, рассматривается как единое целое. Средства управления второго уровня в общем случае включают компьютер (контроллер или вычислительный комплекс) и программы, которые передают данные, обрабатывают прерывания, передают управление программам первого уровня и т.д. Одной из основных функций средств управления второго уровня является синхронизация темпа работы компонентов исполнительной системы с темпом работы оборудования в соответствии с заданной технологией изготовления изделий. Синхронизация выполняется путем инициирования работы соответствующих компонентов в заданные моменты времени, согласно циклограмме (временной диаграмме) функционирования элементов ТСС и программ средств управления, а также текущему состоянию каждого элемента ТСС. Средства управления второго уровня объединяют оборудование станций в единое целое, а оборудование склада — в единый стационарный склад.

На третьем уровне координируется работа станций конкретной линии и стационарного склада. Станции рассматриваются на данном уровне как неделимые единицы. Средства управления третьего уровня включают компьютер и программы, которые передают данные (технологические процессы), обрабатывают прерывания, передают управление программам второго уровня, выполняют программу (технологический процесс) работы линии, обеспечивают необходимые условия эксплуатации линии или склада. На этом уровне также выполняется синхронизация функционирования станций путем инициирования их работы в заданные моменты времени согласно текущему состоянию станций и по определенной временной диаграмме. Средства управления третьего уровня объединяют станции в неделимую линию, стационарный и мобильные склады — в единую складскую систему.

На четвертом уровне осуществляется координация работы складской системы с работой линии сборки. Средства управления четвертого уровня включают компьютер и программы, которые выполняют спроектированную дисциплину работы всей ТСС. Особенно важно согласовать работу робота-штабелера с состоянием позиций приема и съема тары на линиях. Программное обеспечение (ПО) четвертого уровня включает программную систему контроля ТСС и контроля технологии сборки, оно функционирует в диалоговом режиме с пользователем.

Следовательно, АСУ ТСС работает:

- в режиме реального времени, когда она управляет аппаратной частью технологической системы или принимает данные от измерительных станций;
- в диалоговом режиме, когда выполняется настройка системы или анализируются работа и состояние компонентов ТСС, или формируются отчеты по выполнению производственных функций.

Управление и контроль процесса сборки ведется с учетом результатов виртуальной сборки.

**Система автоматизированного проектирования ВС.** Программное обеспечение САПР ВС состоит из четырех компонентов (рис. 3): управляющей программы „монитор“, системы моделирования сборки изделия, системы визуализации процесса сборки изделия, банка данных. Компоненты „монитора“ работают в диалоговом режиме. Системы моделирования (иначе — виртуальной сборки и визуализации) функционируют в автоматическом режиме. Банк данных работает в автоматическом и диалоговом режимах.

Для повышения гибкости линии сборки предусмотрена программная система проектирования технологии сборки изделий, которая способна при выполнении некоторых требований обеспечить такой вариант технологического процесса сборки нового изделия, который может быть реализован на ТСС. Данная система может быть информационно связана с АСУ ТСС и САПР ВС.

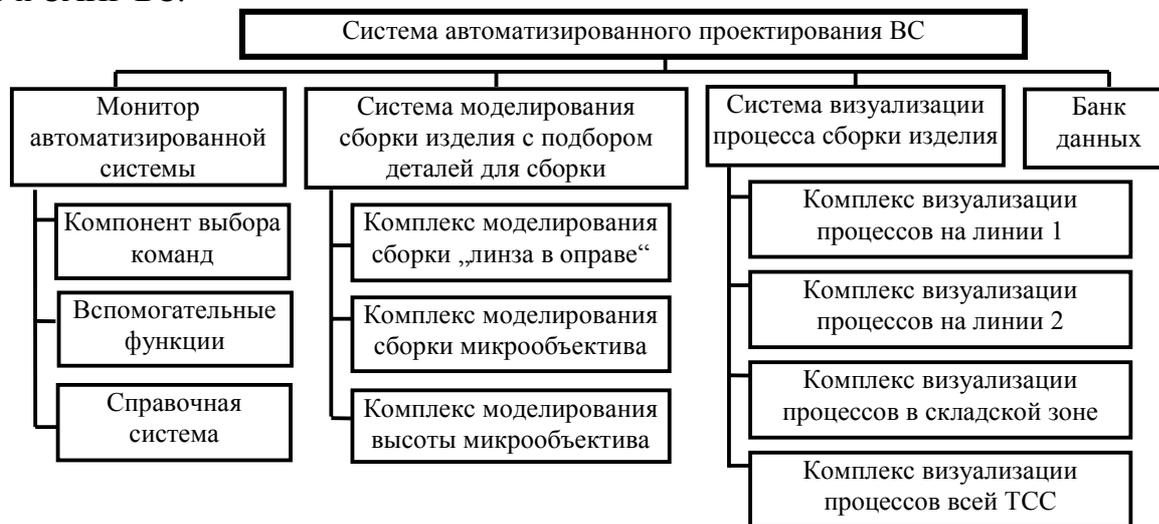


Рис. 3

Рассмотренный подход позволяет обеспечить системе сборки ряд полезных свойств, а именно:

- параллельность выполнения сборочных операций при выходе на устойчивый режим работы ТСС, что является следствием независимой работы линий и станций;
- адаптивность, которая обеспечивается моделированием технологических процессов (и выбором оптимального варианта) при изменении запросов деталей и узлов на стационарном складе;
- оперативность корректировки технологических процессов сборки, которая достигается благодаря возможностям САПР ВС;
- возможность эволюции системы за счет применения методов адаптивно-селективной сборки и перспективного прогноза (применение этих методов не только уменьшает ограничения по объему партии, но и позволяет изменить базовый технологический процесс сборки);
- возможность использования станций комплектации и сборки для оптимизации размещения деталей в таре;
- система сборки строится как прототип будущих производственных систем сборки.

**Заключение.** Предложенный подход уже сегодня является „полигоном“ для проведения научных и практических работ по исследованию и изучению методов обеспечения функциональной точности оптических приборов на этапе их сборки, исследованию методов измерений и созданию стендов для контроля качества прибора, исследованию способов автоматизации сборочных операций и созданию линий сборки, разработке автоматизированных систем управления ТСС и проектирования технологических операций сборки.

В проекте участвуют творческие коллективы специалистов России и Германии, организованы группы преподавателей, аспирантов и студентов разных кафедр, работающих над комплексными проблемами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zocher K.-P. Adaptive und Selektive Montage in der flexiblen Fertigung // Informationsmaterial TU Ilmenau. 2002. Februar. S. 423—424.

2. Падун Б. С., Свердлина И. И. Новый подход к организации технологической подготовки производства с элементами управления точностью // Инструмент и технологии. 2004. № 21—22. С. 99—104.
3. Латыев С. М., Смирнов А. П., Воронин А. А., Падун Б. С., Яблочников Е. И., Фролов Д. Н., Табачков А. Г., Тезка Р., Цохер П. Концепция линии автоматизированной сборки микробиъектива на основе адаптивной селекции их компонентов // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 7. С. 79—83.
4. Tabachkov A. G., Frolov D. N., Latyev S. M., Zocher K.-P. Die Haupttendenzen der Projektierung der Microobjektive // 50<sup>th</sup> Intern. Wissenschaftliches Kolloquium. TU Ilmenau. 2005. S. 535—536.
5. Митрофанов С. П. Групповая технология машиностроительного производства. Л.: Машиностроение, 1983.

#### Сведения об авторах

**Борис Степанович Падун**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: bsp.tps.ifmo@mail.ru

**Святослав Михайлович Латыев**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: latyev@qrv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

УДК 65.011.56 1

Т. И. АЛИЕВ, Б. С. ПАДУН

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ МИКРООБЪЕКТИВОВ

Рассматриваются концептуальная и стохастические модели, а также подходы к оптимизации технологического процесса функционирования линии сборки.

**Ключевые слова:** технологическая линия сборки, технологический процесс, микробиъектив, материальный поток, виртуальная сборка, моделирование.

**Введение.** Высокая стоимость создания и обслуживания современного интеллектуального оборудования, к которому относится автоматизированная технологическая линия сборки (ТЛС) микробиъективов (МО), выдвигает на первый план задачу его эффективного использования. На данном этапе для современной экономики подобные задачи являются первоочередными. Поэтому необходима оптимизация процессов, выполняемых ТЛС, состав и концепция построения которой подробно описаны в работе [1].

### Основные понятия

— Технологический процесс функционирования (ТПФ) ТЛС представляет собой совокупность действий, выполняемых на линии во время изготовления МО (сборка узлов и МО, перемещение объектов — деталей, узлов и МО, измерение деталей и узлов, контроль качества собранных узлов, складирование объектов, комплектация деталей и узлов, передача данных, ожидание). ТПФ имеет несколько уровней декомпозиции: уровень ТЛС, уровень зон и стационарного склада, уровень станций и транспортных линий, уровень отдельных устройств.

— Материальные потоки — это движение тары, деталей и узлов в ТЛС МО. Потоки вне станций — это потоки тары, на станциях — это потоки деталей и узлов.

— Виртуальная сборка — это процесс проектирования ТПФ, на котором по результатам измерений деталей и узлов определяются элементы, входящие в конкретный МО.

**Постановка задачи.** Следует определить загрузку ТЛС в целом и ее отдельных компонентов, оценить время сборки МО и возможность выполнения заказа в заданные сроки,

выявить возможность дополнительной загрузки оборудования, а также обеспечить наивысшую производительность ТЛС за счет применения эффективных методов управления материальными потоками, задаваемыми в виде различных дисциплин обслуживания.

Для решения поставленной задачи необходимо построить концептуальную и математические модели функционирования технологической системы, определить показатели эффективности, сформулировать критерий оптимальности и выполнить модельные эксперименты, направленные на выявление свойств и закономерностей, присущих процессам, которые протекают в исследуемой системе.

**Концептуальная модель функционирования технологической линии сборки.** В ТПФ можно выделить следующие этапы:

1) *начальный этап* — загрузка деталей из мобильных складов в стационарный и локальные склады, на станции измерений, виртуальная сборка узлов „линза в оправе“. На этом этапе функционирует только оборудование зоны измерений и комплектации. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время поступления первой тары на ТЛС до начала проведения результативной виртуальной сборки узлов „линза в оправе“;

2) *переходный этап* — сборка и измерение узлов „линза в оправе“ и деталей, виртуальная сборка МО. На переходном этапе функционирует только оборудование зоны измерений и комплектации. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время от начала сборки узлов „линза в оправе“ до проведения результативной виртуальной сборки МО;

3) *устойчивый этап* включает процессы комплектации стаканов и корпусов и сборки МО. В зоне измерения и комплектации могут параллельно измеряться детали и узлы, собираться узлы „линза в оправе“, комплектоваться детали и узлы с целью освобождения тары, производится виртуальная сборка узлов и МО. В качестве критерия оценки решений следует выбрать производительность линии по сборке МО;

4) *предаварийный этап* — дозагрузка локальных складов, выгрузка пустых тар, тар с браком и тар с собранными МО. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время, затраченное на ликвидацию предаварийной ситуации;

5) *этап выхода из аварийного состояния* включает процесс освобождения на станции комплектации тары, которая не полностью заполнена, и выгрузки пустой тары со стационарного склада, а также загрузки специальной тары на стационарный склад. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время, затраченное на ликвидацию аварийной ситуации;

5) *этап выхода из тупиковой ситуации* — освобождение станций и/или транспортных линий и/или стационарного склада. Этот этап возникает, если процессы сборки, измерений, складирования и т.п. не могут продолжаться из-за непредвиденных обстоятельств. В качестве критерия оценки решений следует выбрать время, затраченное на ликвидацию тупиковой ситуации.

Технологический процесс функционирования ТЛС микрообъективов имеет три особенности. Первая состоит в том, что на начальном и переходном этапах ТПФ является детерминированным, что обеспечивается наличием моделей тар в базе данных, а на переходном этапе к этому добавляется результат виртуальной сборки узлов. Вторая особенность — это неопределенность ТПФ. Сборка МО выполняется по результатам виртуальной сборки, но из-за неточности математических моделей обеспечения качества МО может быть не получена заданная точность сборки стакана и корпуса. Следовательно, во время выполнения ТПФ возникает необходимость его изменения — например, положить стакан или корпус после контроля в тару с браком, отправить специальную тару или тару с браком на склад. Третья особенность — это открытость ТПФ, т.е. его можно пополнять действиями по сборке новых МО после выполнения виртуальной сборки по новым результатам измерений деталей и узлов.

Материальные потоки могут быть трех типов:

а) *независимые* — могут одновременно требовать одни и те же ресурсы и задерживать друг друга. Поэтому возникает задача определения дисциплины обслуживания материальных потоков с наивысшей пропускной способностью;

б) *зависимые* — развиваются строго последовательно. В этом случае требуется только оценка времени обслуживания материальных потоков, чтобы определить общую загрузку ТЛС;

в) *частично зависимые* — при их разветвлении требуется решение задачи обеспечения наивысшей пропускной способности технологической системы сборки, но, учитывая периоды последовательного их выполнения, необходимо отдельно определить общую загрузку ТЛС.

В каждом типе выделяются детерминированные и стохастические материальные потоки.

В складской зоне материальные потоки обслуживаются роботом-штабелером, поэтому все процессы по перемещению тары могут выполняться строго последовательно. Время обслуживания одного материального потока определяется по зависимости:

$$T = t_x + t_b + t_d + t_y, \quad (1)$$

где  $t_x$  — время подхода робота-штабелера к заданной позиции,  $t_b$  — время взятия тары,  $t_d$  — время доставки тары в заданную позицию,  $t_y$  — время установки тары (здесь и далее если используется „ $T$ “, предполагается, что существуют различные варианты расчета времени, если „ $t$ “ — возможен только один вариант расчета).

Схема обслуживания материальных потоков в складской зоне определяется непосредственно во время виртуальной сборки, поэтому все составляющие выражения (1) — это детерминированные величины. Исключение составляют некоторые материальные потоки, связанные с зоной 2 [1]: доставка на стационарный склад бракованных узлов, загрузка пустой тары и тары с новым комплектом компенсаторов. Следовательно, возникает необходимость установления вероятности задержки процессов сборки МО и определения дисциплин обслуживания материальных потоков, что позволит минимизировать время задержки процессов сборки МО. На основе анализа материальных потоков формируются рекомендации по реорганизации работы складской зоны.

В зоне измерений и комплектации обслуживание материальных потоков происходит с помощью транспортной линии и трех станций (комплектации и сборки узлов, бесконтактного и контактного измерения деталей и узлов). Транспортная линия зоны не имеет параллельных веток. Но технология работы станций зоны предполагает съём с транспортной линии тары на специальные столики станций, что позволяет организовать параллельное обслуживание материальных потоков. Время обслуживания материального потока определяется в соответствии со следующими зависимостями:

— при комплектации и сборке или при комплектации, или при измерении

$$T = T_n + T_p + T_c, \quad (2)$$

— при комплектации, сборке и измерении узла „линза в оправе“

$$T = T_n + t_{py} + T_{и} + T_{ри} + T_c, \quad (3)$$

где  $T_n$  — время перемещения шаттла (с тарой или без нее) на соответствующую станцию,  $T_p$  — время выполнения работ по комплектации или измерениям,  $t_{py}$  — время выполнения работ по сборке узла „линза в оправе“,  $T_{и}$  — время перемещения тары с узлами „линза в оправе“ на позицию соответствующей станции измерений,  $T_{ри}$  — время измерения узлов на соответствующей станции измерений,  $T_c$  — время перемещения тары от соответствующей станции до позиции съема.

Время  $T_n$  в общем случае определяется по зависимости:

$$T_n = t_T + T_o + t_{cr}, \quad (4)$$

где  $t_t$  — время движения шаттла по транспортной линии до соответствующей станции,  $T_o$  — время ожидания около предыдущих станций, если занято оборудование,  $t_{ct}$  — время снятия тары с шаттла на станцию.

За счет виртуальной сборки все составляющие выражений (2)—(4) являются детерминированными величинами, а значение  $T_o$  можно свести к нулю. Исключение составляет время  $t_{py}$ , которое является стохастической величиной. Поэтому необходимо определить значения вероятности сборки узлов МО, определить дисциплины обслуживания материальных потоков, позволяющие минимизировать время их задержки, и сформировать рекомендации по организации работы станции сборки узлов „линза в оправе“.

В зоне сборки МО материальные потоки обслуживаются с помощью транспортной линии и пяти станций сборки и контроля качества МО. Технологические операции по сборке и контролю МО выполняются строго последовательно. Для организации материальных потоков выявленных в результате контрольных операций бракованных узлов МО предусмотрены параллельные транспортные ветви. Таких потоков два. Технология работы станций зоны сборки предполагает возможность съема с транспортной линии тары на специальные устройства станций. Поэтому станции можно условно рассматривать как дополнительные ветки транспортной линии и, следовательно, освобождать транспортную линию для перемещения тары с дополнительными комплектующими деталями и удаления освободившейся тары.

Время обслуживания материального потока определяется по зависимостям:

— при комплектации станций

$$T = T_{п} + T_{лс}, \quad (5)$$

— при сборке МО

$$T = T_{п} + t_{pc} + t_{pa} + t_{pk} + t_{pv} + t_{po} + T_{м} + T_{с}, \quad (6)$$

— при удалении со станции тары (с браком МО, пустой тары и т.д.)

$$T = T_{п} + T_{с}, \quad (7)$$

где  $T_{лс}$  — время установки тары в локальный склад,  $t_{pc}$  — время выполнения работ по сборке узла „стакан“,  $t_{pa}$  — время выполнения работ по контролю качества изображения,  $t_{pk}$  — время выполнения работ по сборке узла „корпус“,  $t_{pv}$  — время выполнения работ по контролю высоты МО,  $t_{po}$  — время выполнения работ по окончательной сборке МО,  $T_{м}$  — время перемещения тары между станциями.

За счет виртуальной сборки многие составляющие выражения (5)—(7) являются детерминированными величинами, время  $T_o$  можно свести к нулю. Исключением являются материальные потоки удаления бракованных МО, выгрузки и догрузки измеренных деталей и узлов, а также времена  $t_{pa}$  и  $t_{pv}$ , которые являются стохастическими величинами. Поэтому необходимо определить значение вероятности сборки узлов МО, определить дисциплины обслуживания материальных потоков, позволяющие минимизировать время их задержки, и сформулировать рекомендации по организации работы станций сборки узлов МО.

**Модель ТПФ технологической линии сборки.** В качестве моделей ТПФ могут использоваться стохастические модели, позволяющие учесть случайный характер протекающих в ТЛС процессов, а также принцип многоуровневого иерархического моделирования [2], в соответствии с которым на основе простейших базовых моделей, учитывающих наиболее важные особенности ТЛС, могут строиться более сложные модели, отображающие свойства отдельных подсистем (локальные модели) или всей системы в целом (глобальные модели). Для обеспечения корректности и повышения достоверности результатов моделирования эффективным является комбинированный подход, основанный на сочетании аналитического и имитационного моделирования ТПФ ТЛС.

Оценка загрузки оборудования и анализ влияния различных способов организации на характеристики ТПФ линии сборки микробиъективов могут быть выполнены с использованием структурно-функциональных моделей, построенных в терминах теории очередей, изучающей стохастические системы обслуживания с дискретным характером функционирования [2].

Модель ТПФ ТЛС МО может быть представлена как открытая сеть очередей. На рис. 1 представлен фрагмент модели, отображающий процессы, протекающие в зоне комплектации и измерений изделий и зоне сборки МО. Каждый узел отображает соответствующие этапы ТЛС МО: этап 1 с двумя параллельными фазами  $P_{11}$  и  $P_{12}$  — измерение оптических (фаза  $P_{11}$ ) и механических (фаза  $P_{12}$ ) деталей МО; этап 2 — сборка узлов; этап 3 — сборка МО.

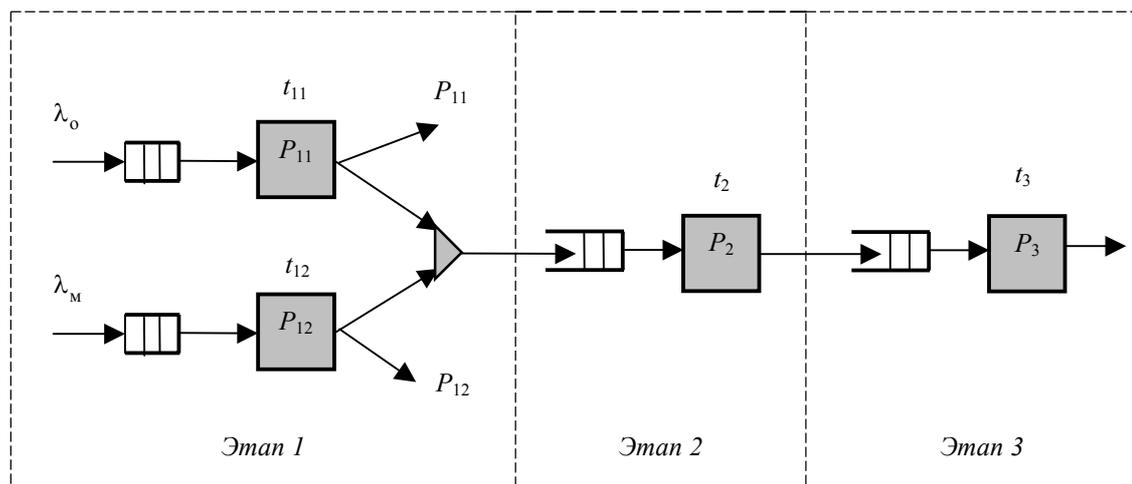


Рис. 1

В качестве исходных параметров модели задаются интенсивность поступления оптических  $\lambda_o$  и механических  $\lambda_m$  деталей, время  $t_{11}, t_{12}, t_2, t_3$  выполнения технологических операций на каждом этапе и вероятность  $p_{11}, p_{12}$  появления бракованных оптических и механических деталей. Без потери общности положим, что  $\lambda_o = \lambda_m = \lambda$ . Кроме того, учитывая, что некоторые материальные потоки и процессы сборки узлов ТПФ являются случайными, необходимо задать вероятностные законы распределения соответствующих случайных величин. Поскольку не все значения априори известны, моделирование может проводиться при различных предположениях о характере поступления и обработки деталей с целью анализа различных вариантов организации ТПФ.

Реализация представленной модели может выполняться с использованием как аналитических, так и имитационных методов [3]. Применение аналитических методов предполагает введение ряда ограничений на параметры и характер функционирования ТЛС в виде допущений и предположений. В частности, точные методы расчета характеристик разомкнутых сетевых моделей могут быть получены только для так называемых экспоненциальных моделей, в которых процессы поступления и обслуживания заявок, в качестве которых в нашем случае выступают оптические и механические детали, должны быть марковскими, т.е. временные интервалы между поступающими заявками и времена их обслуживания должны быть распределены по экспоненциальному закону [2]. Если указанные законы распределения отличаются от экспоненциальных, погрешности расчета вероятностно-временных характеристик ТПФ технологической линии сборки МО могут оказаться значительными. В то же время при оценке загрузки оборудования аналитический подход позволяет получить точные результаты, поскольку нагрузка определяется средними значениями параметров и не зависит от вероятностных распределений.

**Характеристики процесса функционирования ТЛС.** На основе перечисленных параметров могут быть рассчитаны характеристики, описывающие эффективность функционирования ТЛС. Расчет характеристик ТПФ линейных разомкнутых однородных экспоненциальных сетевых моделей базируется на эквивалентном преобразовании сети [2].

Значения интенсивности потоков деталей, поступающих на этапы 2 и 3, одинаковы и рассчитываются как

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \min\{(1-p_{11}); (1-p_{12})\}\lambda.$$

Общее время, затрачиваемое на сборку МО, может быть рассчитано по формуле

$$T = \max\left\{\frac{t_{11}}{1-\rho_{11}}; \frac{t_{12}}{1-\rho_{12}}\right\} + \frac{t_2}{1-\rho_2} + \frac{t_3}{1-\rho_3} = \sum_{i=1}^3 \frac{t_i}{1-\rho_i},$$

где

$$\max\left\{\frac{t_{11}}{1-\rho_{11}}; \frac{t_{12}}{1-\rho_{12}}\right\} = \frac{t_1}{1-\rho_1};$$

$\rho_{11} = \lambda t_{11}$ ;  $\rho_{12} = \lambda t_{12}$  — коэффициенты загрузки оборудования на обеих фазах первого этапа;  $\rho_1 = \max\{\rho_{11}; \rho_{12}\}$ ;  $\rho_2 = \Lambda_2 t_2$ ;  $\rho_3 = \Lambda_3 t_3$  — коэффициенты загрузки оборудования соответственно на первом, втором и третьем этапах ТПФ ТЛС МО.

На рис. 2 представлен характер зависимости  $T' = f'(\lambda)$  времени, затрачиваемого на сборку МО, от интенсивности  $\lambda$  поступления деталей на ТЛС. Отметим, что имеется некоторое предельное значение интенсивности  $\lambda'_{\max}$ , при

котором среднее время сборки МО становится бесконечно большим, что свидетельствует о перегрузке в ТЛС, наступающей, когда загрузка одного из узлов становится равной единице. Такой узел называется „узким местом“ и характеризуется тем, что очередь из деталей перед ним со временем растет до бесконечности. Разгрузить „узкое место“ возможно, например, повышая скорость сборки узлов и МО, что позволяет увеличить производительность ТЛС в целом и как следствие — улучшить характеристики ее функционирования.

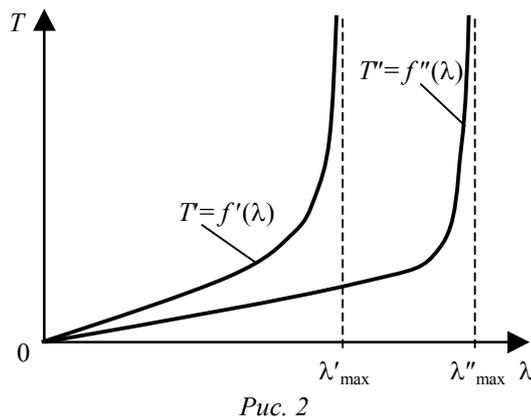


Рис. 2

Зависимость среднего времени сборки МО от интенсивности  $\lambda$  поступления деталей в ТЛС принимает вид  $T'' = f''(\lambda)$ , т.е. время сборки МО при одной и той же интенсивности поступления деталей  $\lambda$  становится меньше, а предельное значение интенсивности  $\lambda''_{\max}$ , при котором наступает перегрузка, становится больше:  $\lambda''_{\max} > \lambda'_{\max}$ . При этом, возможно, появится новое „узкое место“, и дальнейшее улучшение ТЛС может быть достигнуто путем его разгрузки, что, очевидно, означает увеличение ее стоимости. Наилучший вариант построения ТЛС достигается в случае равенства загрузки всех устройств, входящих в состав ТЛС. Такая система называется сбалансированной.

Для того чтобы в системе не было перегрузок, необходимо выполнение условия [2]:

$$\lambda < \min(t_{11}^{-1}; t_{12}^{-1}; qt_2^{-1}; qt_3^{-1}),$$

где  $q = \min\{(1-p_{11}); (1-p_{12})\}$ .

Выражение в правой части представленного неравенства определяет максимально допустимую интенсивность поступления деталей на ТЛС МО. Если указанное условие не выполняется, то стационарный режим в ТЛС может быть реализован одним из следующих способов: уменьшением интенсивности  $\lambda$  поступления деталей на ТЛС или уменьшением

длительности  $t_j$  обработки в перегруженных узлах до значений, при которых это условие будет выполняться.

**Задача оптимизации.** Рассмотрим теперь задачу оптимизации ТПФ линии сборки МО с использованием представленной модели. Предположим, что для любой конфигурации технических средств и стратегии управления ТПФ, содержащим в общем случае  $n$  этапов обработки и сборки МО, могут быть определены коэффициенты простоя оборудования  $\eta_1, \dots, \eta_n$  на каждом из этапов,  $\eta_i = 1 - \rho_i$ , и среднее время  $T$  сборки МО. Значения  $\eta_1, \dots, \eta_n$  и  $T$  зависят, в первую очередь, от времени обслуживания на каждом этапе, которое определяется быстродействием оборудования и количеством параллельно обрабатывающих станций, а также от стратегии управления в ТЛС.

Положим, что  $z$  — „штраф“ за задержку на единицу времени в процессе сборки МО. Рассмотрим суммарные потери

$$F = \sum_{i=1}^n s_i \eta_i + zT \quad - \quad \min, \quad (8)$$

где  $s_i$  — стоимость оборудования, используемого на  $i$ -м этапе.

Первое слагаемое  $F_1 = \sum_{i=1}^n s_i \eta_i$  в (8) определяет цену простоя оборудования, а второе  $F_2 = zT$  — цену задержки в процессе сборки МО. Таким образом, величина  $F = F_1 + F_2$  характеризует суммарные потери в ТЛС: чем меньше эти потери, тем выше эффективность ВС. Показатель  $F$  называется критерием сбалансированности выполнения процесса. Загрузка оборудования определяет эффективность использования ресурсов системы. При равных условиях более высокую эффективность имеет система, оборудование которой наиболее полно используется в процессе сборки МО, так как система с большей загрузкой оборудования имеет в среднем более высокую производительность, т.е. обеспечивает сборку большего количества МО в единицу времени. Указанные характеристики зависят от целого ряда параметров, определяющих как нагрузку (время сборки МО на каждом этапе и интенсивность поступления деталей для сборки МО), так и структурно-функциональную организацию системы.

Для определения оптимальных значений времени обработки  $t_1, \dots, t_n$  на каждом этапе ТПФ запишем выражения для расчета коэффициентов простоя и времени сборки МО:

$$\eta_i = 1 - \rho_i = 1 - \lambda_i t_i \quad (i = \overline{1, n}); \quad T = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{1 - \lambda_i t_i}.$$

Тогда выражение (8) примет вид

$$F = \sum_{i=1}^n s_i (1 - \lambda_i t_i) + z \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{1 - \lambda_i t_i} \quad - \quad \min.$$

Взяв частные производные от  $F$  по  $t_i$  и приравняв их к нулю, получим систему уравнений, решение которой имеет вид:

$$t_i = \frac{1}{\lambda_i} \left( 1 - \sqrt{\frac{z}{s_i \lambda_i}} \right) \quad (i = \overline{1, n}). \quad (9)$$

Выражение (9) определяет оптимальные значения  $\{t_1, \dots, t_n\}_{\text{opt}}$  времени сборки МО на каждом этапе ТПФ, которые могут быть достигнуты за счет использования оборудования с соответствующей производительностью или за счет параллельной сборки на нескольких однотипных устройствах в пределах одного этапа.

**Заключение.** Рассмотренная задача моделирования и оптимизации ТПФ ТЛС микрообъективов решалась при использовании ряда допущений и предположений, которые позволили получить результат в явном аналитическом виде. Одним из таких допущений являлось предположение о беспriorитетной дисциплине обслуживания в процессе сборки МО. При использовании других дисциплин, в том числе приоритетных, в качестве моделей ТЛС необходимо применять неоднородные сетевые модели [2]. Задачи оптимизации процесса с использованием неоднородных моделей будут рассмотрены в последующих публикациях.

В общем случае оптимизация технологического процесса функционирования линии сборки микрообъективов потребует громоздких математических выкладок, которые могут привести к получению приближенных аналитических результатов. В этом случае необходимо проведение детального исследования оптимизированной системы с использованием средств имитационного моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Падун Б. С., Латышев С. М. Интегрированная система автоматизации сборки микрообъектива // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 8. С. 34—39.
2. Алиев Т. И. Математические методы теории вычислительных систем. Л.: ЛИТМО, 1979.
3. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. СПб: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. 847 с.

#### *Сведения об авторах*

**Тауфик Измайлович Алиев**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: aliev@d1.ifmo.ru

**Борис Степанович Падун**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: bsp.tps.ifmo@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

---

---

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

---

---

УДК 623.5

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ

## ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ОСВОЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА МИРОВОГО ОКЕАНА

Рассматривается возможность применения малогабаритных необитаемых подводных аппаратов для освоения ископаемых ресурсов континентального шельфа прилегающих к России морей и океанов. Обосновывается актуальность создания подобных средств освоения Мирового океана, а также необходимость разработки технологической оснастки для обеспечения их комплексных испытаний в производственных условиях.

*Ключевые слова:* подводные технологии, автономные необитаемые подводные аппараты, пусковые устройства, гидродинамические стенды.

Сегодня в мировой геополитике на первый план выходит борьба за контроль над источниками, рынками и распределением энергоносителей. На рис. 1 представлено расположение доступных для промышленной разработки основных районов мировых запасов углеводородного сырья на континентальном шельфе (районы выделены рамками).

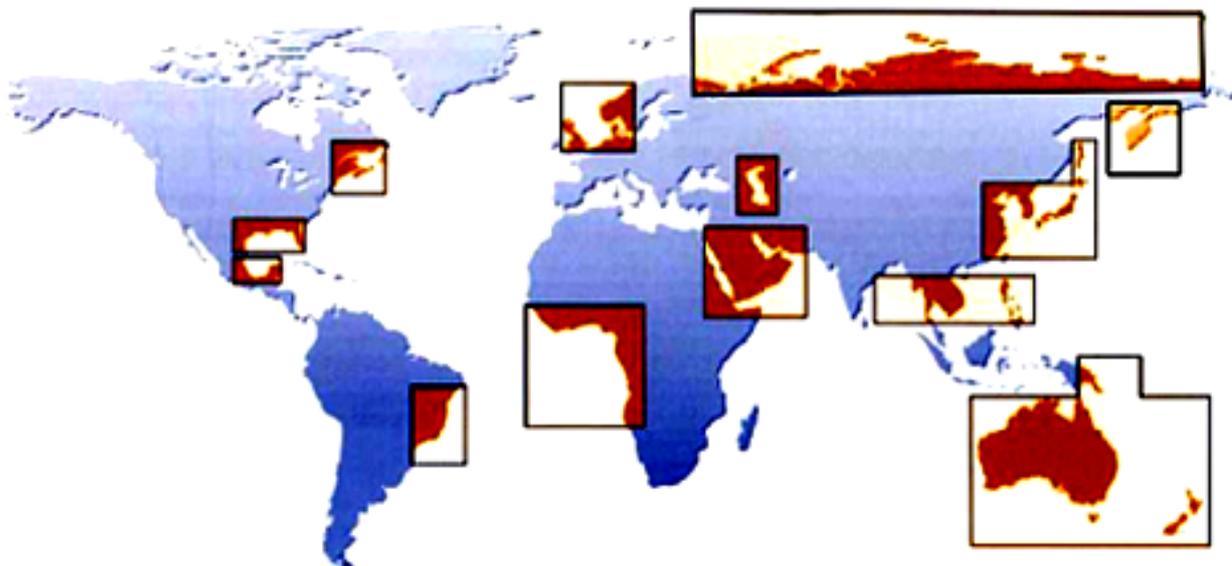


Рис. 1

Уровень добычи нефтегазовых компаний в районе континентального шельфа океанской зоны в настоящее время составляет около трети от общемирового, однако по мере исчерпания

запасов наземных месторождений и залежей определилась устойчивая тенденция к дальнейшему расширению промыслового пространства. Фронт разведки и добычи полезных ископаемых все более удаляется от берега, и соответственно увеличивается глубина проведения работ, которая в настоящее время достигла 1000 м (есть примеры бурения на глубине до 3000 м). Для современного этапа развития российской нефтегазовой индустрии также стал характерен переход к освоению морских шельфовых залежей Балтийского, Черного, Каспийского, Баренцева и других морей, прилегающих к границам Российской Федерации [1].

Как показывает опыт, этот вид хозяйственной деятельности относится к числу наиболее опасных и может сопровождаться внезапными экологическими катастрофами. Поэтому одним из приоритетов при проектировании морских трубопроводных систем и сооружений по добыче углеводородного сырья является строжайшее соблюдение норм и правил экологической и технической безопасности.

При проведении работ на континентальном шельфе основные риски могут быть связаны с

- малоизученными процессами и явлениями в геологической среде;

- экстремальными гидрометеорологическими условиями и природно-климатическими факторами;

- неконтролируемой экономической и военной деятельностью на море;

- затопленным химическим оружием и другими боеприпасами;

- нештатными технологическими процессами на буровых платформах и транспортных средствах, а также нарушением режимов их эксплуатации;

- терроризмом, атакой на энергоресурсы со стороны потенциального политических, экономических или военных конкурентов и др.

С целью минимизации вышеуказанных рисков в работах по освоению морских ресурсов необитаемые подводные аппараты (НПА) используются уже сегодня. В будущем их применение станет массовым. При этом НПА могут быть использованы для решения следующих задач:

- изучения районов будущего строительства;

- комплексного мониторинга текущего состояния районов прокладки трубопроводов и строительства сооружений для морских промыслов;

- наблюдения за трассами трубопроводов, обследования их технического состояния, обнаружения аварийных и предаварийных участков;

- охраны морских участков от несанкционированного проникновения с целью террористических действий (выявление источников террористической угрозы, слежение за ними, их нейтрализация и т.д.) [1].

За последние два десятилетия за рубежом было создано значительное число самоходных НПА, в том числе автономных (АНПА), ориентированных на решение широкого круга гражданских и военных задач. За этот период АНПА продемонстрировали свою эффективность при выполнении обзорно-поисковых и исследовательских работ на шельфе Мирового океана. Вследствие относительно низкой стоимости производство АНПА может быть крупносерийным, а их применение широкомасштабным [1].

АНПА, характеризующиеся (за счет исключения необходимости постоянного сопровождения обеспечивающим судном) меньшей, по сравнению с привязными НПА, стоимостью эксплуатации, представляются наиболее перспективными для решения ряда задач, прежде всего для работы подо льдом в Арктике. Повышенная, в сравнении с НПА других типов, техническая сложность АНПА и относительно небольшой опыт в их создании и использовании обуславливают необходимость выполнения большего объема научно-исследовательских работ для их создания [1].

Одной из важных проблем в использовании НПА является их отделение от носителя, прежде всего — энергетическое обеспечение процесса пуска с соблюдением требований по

безопасности носителя и гарантированному выходу изделия на запрограммированную подводную траекторию и скорость его движения [2].

Функционирование энергетической системы пускового устройства (ПУ), позволяющего решать перечисленные задачи, зависит от источника энергии, схемы ее преобразования, способа формирования во времени выталкивающей силы, способа обеспечения бесследности пуска.

Особенностью работы подводных ПУ является необходимость создания большой выталкивающей силы при сравнительно малом суммарном расходе энергии. Это накладывает существенные ограничения на выбор рациональных схем энергетических систем пусковых устройств. Вид применяемой в них энергии оказывает существенное влияние на взаимосвязи ПУ и носителя. В большинстве случаев ввиду ограниченной мощности источников энергии корабля и большой импульсной мощности ПУ, в их энергосистему необходимо включать автономные источники, иногда — накопители энергии.

Основными имеющимися на корабле источниками энергии являются: воздух высокого давления (ВВД), гидравлика высокого давления, электроэнергия. Кроме того, может использоваться механическая и пиротехническая энергия [2].

В качестве пусковых установок, обеспечивающих безопасность транспортировки, кантования, хранения на носителе и подводного пуска НПА, используются транспортно-пусковые контейнеры (ТПК). Они, как правило, не влияют на маневренные характеристики носителя, поскольку располагаются вне его прочного корпуса. Примером подобной пусковой установки может служить разработанный при участии автора настоящей статьи ТПК [3], внешний вид которого приведен на рис. 2.

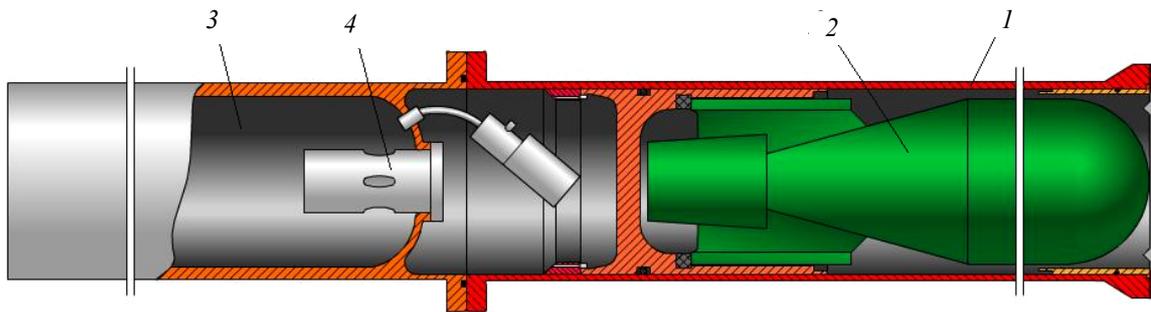


Рис. 2

Представленный ТПК включает пусковую трубу 1, в которой расположен приготовленный к пуску НПА 2, автономный источник энергии 3 и регулятор ее расхода 4, позволяющий обеспечить требуемую выходную скорость аппарата во всем рабочем диапазоне глубин.

Описываемые технические решения позволяют создать новый вид подводных комплексов, включающих подводные роботы и их пусковые системы [1], поэтому важнейшее значение при их проектировании и внедрении в производство имеют вопросы всесторонних испытаний ТПК, отработки их опытных образцов и предъявления готовой продукции заказчику. Многие из этих задач до сих пор и теоретически, и практически не разрешены.

На сегодняшний момент в нашей стране появляется очень мало публикаций по проблемам технологического обеспечения отработки автоматических подводных пусковых систем для новых образцов подводных аппаратов.

Испытание вновь создаваемых пусковых комплексов в натуральных условиях неизбежно влечет за собой значительные временные и финансовые затраты, а также невозможность своевременного планирования проводимых исследований из-за постоянно изменяющихся внешних факторов. При этом необходимо учитывать, что для осуществления наладочных работ и доказательства работоспособности пусковых устройств, а также их ресурсных испытаний количество требуемых технологических срабатываний обычно превышает 1500—2000 циклов. Поэтому

создание специализированных испытательных стендов, позволяющих многократно имитировать работу проектируемого устройства в воспроизводимых условиях, максимально приближенных к естественным, является одной из наиболее приоритетных задач при создании перспективных образцов морской подводной техники.

Некоторые задачи, поставленные в настоящей статье, планируется решать в НИЦ 1 СПбГУ ИТМО.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кыбальный М. В., Кудрявцев М. А. О подводных промышленных роботах, предназначенных для работ на шельфе // Науч.-технич. сб. „Подводное морское оружие“. СПб: ЦНИИ „Гидроприбор“, 2008. Вып. 12.
2. Ефимов О. И., Красильников Е. П., Шавырин И. А., Юрин В. Ф. Забортные модули вооружения подводных лодок: возможные решения // Оборонный заказ. СПб: „Морская газета“, 2008. Вып. 18.
3. Патент РФ № 87511. Транспортно-пусковой контейнер подводного аппарата / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников. 2009.

#### Сведения об авторе

**Антон Валентинович Красильников** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

УДК 623.5

В. А. ВАЛЕТОВ, А. В. КРАСИЛЬНИКОВ

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ ОТРАБОТКИ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Предложено принципиальное решение оригинальной конструкции гидродинамического стенда для опытной отработки пусковых устройств необитаемых малогабаритных подводных аппаратов в условиях производственных помещений. Приведена методика расчетного обоснования технических характеристик гидродинамического стенда предложенной схемы.

**Ключевые слова:** автономные необитаемые подводные аппараты, система динамического пуска изделий, испытания, гидродинамический стенд, технические характеристики, проектное обоснование.

Качество любых изделий в широком смысле этого понятия в огромной степени зависит от уровня технологической подготовки их производства. К этой многогранной проблеме, являясь ее важнейшей составляющей, относится проектирование и изготовление технологического оснащения. При этом особая роль отведена разработке исследовательских и испытательных стендов, без которых создание изделий, работающих в особо сложных условиях, часто оказывается невыполнимой задачей.

К категории таких изделий относятся подводные аппараты (ПА), а также их пусковые устройства (ПУ), обеспечивающие хранение и безаварийное отделение ПА от различных носителей. Для опытной отработки подобных систем и оптимизации их характеристик используются специализированные исследовательские гидродинамические стенды (ГДС). Многие переменные и константы процессов, сопровождающих работу ПУ, пока могут определяться

только экспериментально, поэтому роль гидродинамических испытательных стендов чрезвычайно велика. Авторами предложена методика проектирования гидродинамического стенда, а также создана математическая модель его работы и разработана схема ее применения в варьируемых реальных условиях. В настоящей статье приводится один из фрагментов общей математической модели.

На рис. 1 приведена структура гидродинамического стенда (ГДС) для испытаний комплексов малогабаритных ПА, по которому получен приоритет на изобретение одним из авторов статьи [1]. Здесь 1 — камера-имитатор забортной среды; 2 — шлюзовая полость (ШП); 3 — крышка ШП; 4 — быстроразъемный узел крепления; 5 — ПУ; 6 — ПА; 7 — направляющий аппарат ГДС; 8 — тормозное устройство ГДС; 9 — кольца обтюрации переменного сечения; 10 — шток измерителя перемещения ПА; 11 — демпфирующая полость ГДС; 12 — поршень; 13 — упор начального положения поршня; 14 — сигнализатор начального положения поршня; 15 — клапан наполнения; 16 — клапан сброса давления; 17 — сливной бак; 18 — насос; 19 — клапаны осушения; 20 — клапаны заполнения; 21 — клапаны вентиляции; 22 — манометры.

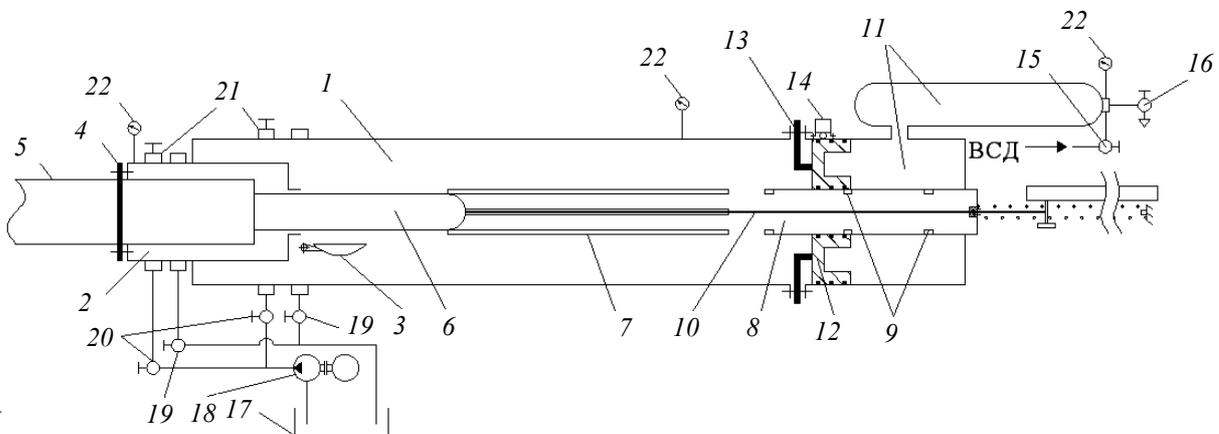


Рис. 1

При пуске аппарата 6 из ПУ 5 осуществляется преобразование энергии воздуха высокого давления (ВВД) в движение поршня силовой установки, выталкивающего ПА за пределы пусковой трубы ПУ. При этом ввиду того что площадь поперечного сечения поршня больше площади поперечного сечения ПА, происходит увеличение скорости последнего с передаточным числом больше единицы и пропорциональным отношением этих площадей; следует отметить, что это передаточное число непостоянно вследствие потерь воды из полости пусковой трубы через обтюрацию, которые зависят от соотношения давлений в полости расширения воздуха (внепоршневой полости) и внешнего гидростатического давления  $P_h$ . Значение последнего в условиях ГДС также нельзя считать постоянным, поскольку давление в его демпфирующей полости 11 изменяется по мере ее уменьшения, вызванного движением аппарата и потерями воды через обтюрацию ПУ.

Предварительный анализ показывает, что в процессе работы ГДС можно выделить три переходящих друг в друга этапа.

1. Первый этап начинается с момента открытия проходного сечения в пусковом клапане (регуляторе ВВД) ПУ. Давление в его расширительной полости возрастает до величины, превышающей забортное давление, с учетом инерции поршня и механического трения в его уплотнениях. С этого момента начинается движение поршня ПУ, приводящее к повышению давления перед поршнем и в пусковой трубе. Движение воды через обтюрацию начинается сразу после того, как значение давления в пусковой трубе превысит значение забортного. Когда это превышение достигнет величины, обеспечивающей преодоление инерции ПА, сил механического трения его перемещения и силового воздействия, необходимого для прорыва

мембраны, закрывающей пусковую трубу, произойдут страгивание ПА и дальнейший его разгон с преодолением возникающего гидродинамического сопротивления, а по прохождении определенного пути — и сил трения изделия о направляющий аппарат 7 в камере 1 ГДС. Этот этап работы ГДС заканчивается подходом демпфирующего кольцевого плунжера поршня к соответствующей полости тормозного устройства ПУ. Следует отметить, что нестационарность всех упомянутых процессов будет также определяться изменением давления в демпфирующей полости 11 стенда.

2. На втором этапе происходит торможение поршня до полной его остановки за счет вытеснения воды плунжером поршня из замыкаемой полости тормозного устройства ПУ. При этом ПА продолжает продольное движение в направляющем аппарате 7 ГДС по инерции, а освобождаемый им в пусковой трубе объем перед поршнем заполняется водой из камеры ГДС под переменным давлением в демпфирующей полости 11 стенда. На этом этапе поршень полностью останавливается, закрывая воздух в расширительной полости, давление в которой постепенно уравнивается с давлением в баллоне ВВД. При этом ПА полностью выходит из пусковой трубы (этот момент времени и соответствующая ему выходная скорость аппарата обязательно должны регистрироваться), носовая оконечность ПА подходит к тормозной трубе 8.

Стабилизация давления в демпфирующей полости 11 связана с полной остановкой поршня ПУ, поскольку движение ПА в камере 1 стенда не приводит к изменению объема демпфирующей полости.

3. На третьем этапе происходят торможение и полная остановка аппарата в трубе 8 тормозного устройства ГДС. Одной из задач баллистического проектирования стенда является разработка системы 9 обтюрации в тормозном устройстве, обеспечивающей безопасность работ при аварийном наборе аппаратом скорости, превышающей предельную расчетную.

В процессе работы ПУ в условиях стенда имеет место взаимовлияние всех элементов системы ПУ—ПА—ГДС. Такая система взаимосвязанных процессов обуславливает необходимость составления аналитических описаний этих взаимосвязей на основе известных физических законов, а именно [2]:

— газодинамических, позволяющих выявить изменение значений давления в баллоне ВВД, расширительной (внепоршневой) полости с учетом нестационарного расхода газа через переменные сечения в изменяющихся с глубиной отработки условиях, а также демпфирующей полости;

— закона движения твердых тел (поршня, аппарата) под действием внешних сил, включая силы трения взаимодействующих элементов (в том числе и в уплотнительных узлах);

— законов гидродинамики с учетом конкретных условий истечения воды через обтюрацию, а также в тормозных устройствах для поршня и изделия.

Описание работы ГДС состоит из двух частей:

— математической модели движения изделия в ПУ при переменном внешнем давлении;

— математической модели работы демпфирующей полости ГДС.

Основные допущения, принятые при составлении математической модели работы ПУ:

— в выделенных газовых полостях — объеме баллона ВВД ( $V_6$ ) и объеме расширительной полости ПУ ( $V_p$ ) — газ (воздух) находится в равновесном состоянии, т.е. параметры газа в любой точке объема полости одинаковы;

— процессы в полостях  $V_6$  и  $V_p$  — адиабатические, отсутствует теплообмен с внешней средой;

— рабочее тело — идеальный газ;

— жидкость несжимаема;

— во всех точках объема пусковой трубы давление жидкости одинаково.

Динамика состояния газа в баллоне ВВД и расширительной полости для адиабатического процесса определяется рядом уравнений.

Функция  $q$  расхода воздуха записывается в следующем виде:

$$q = \begin{cases} 1, & \frac{P_p}{P_6} < \sigma_{кр}; \\ \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{P_p}{P_6} - \sigma_{кр}\right)^2}{(1 - \sigma_{кр})^2}}, & \frac{P_p}{P_6} \geq \sigma_{кр}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_p$  — давление в расширительной полости ПУ, Па;  $P_6$  — давление в баллоне ВВД, Па;  $\sigma_{кр} = 0,528$  — критическое отношение давлений  $P_p/P_6$ .

Расход  $G$  из баллона с воздухом высокого давления:

$$G = \mu f \frac{P_6}{\sqrt{RT_6}} q, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода воздуха;  $f$  — площадь проходного сечения в регуляторе расхода ВВД, м<sup>2</sup>;  $R = 281$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $T_6$  — температура воздуха в баллоне ВВД, К.

Изменение массы воздуха  $m_6$  в баллоне ВВД

$$\frac{d}{dt} m_6 = -G, \quad (3)$$

изменение давления в баллоне

$$\frac{d}{dt} P_6 = \frac{-k}{V_6} RT_6 G, \quad (4)$$

где  $k = 1,41$  — показатель адиабаты;  $V_6$  — объем баллона, м<sup>3</sup>.

Изменение температуры в баллоне ВВД:

$$\frac{d}{dt} T_6 = \frac{T_6}{P_6 V_6} \left( V_6 \frac{d}{dt} P_6 - RT_6 G \right), \quad (5)$$

изменение массы газа  $m_p$  в расширительной полости

$$\frac{d}{dt} m_p = G. \quad (6)$$

Изменение давления в расширительной полости

$$\frac{d}{dt} P_p = \frac{k}{V_p} RT_6 G - \frac{k}{V_p} P_p \frac{d}{dt} V_p, \quad (7)$$

где  $V_p$  — объем расширительной полости, м<sup>3</sup>.

Изменение объема расширительной полости

$$\frac{d}{dt} V_p = \frac{d}{dt} Q_v + f_{ПА} v_{ПА}, \quad (8)$$

где  $Q_v$  — утечки воды через зазор в обтюрации ПУ, м<sup>3</sup>/с;  $f_{ПА}$  — площадь поперечного сечения ПА, м<sup>2</sup>;  $v_{ПА}$  — текущая скорость ПА, м<sup>2</sup>/с.

Изменение температуры воздуха  $T_p$  в расширительной полости

$$\frac{d}{dt} T_p = \frac{T_p}{P_p V_p} \left( V_p \frac{d}{dt} P_p + P_p \frac{d}{dt} V_p - RT_p G \right). \quad (9)$$

Для учета влияния стенда на работу ПУ введем понятие „коэффициент соответствия“  $\delta$ . Для его оценки следует найти такое начальное (установочное) давление  $P_0$  в имитационной полости стенда, соответствующее гидростатическому давлению  $P_h$  на исследуемой глубине пуска ПА  $h$ , при котором расчетная выходная скорость  $v_{\text{вых}}$  ПА, полученная в условиях ГДС, соответствовала бы расчетной выходной скорости в натуральных условиях. Оценка  $\delta$  выполнялась путем итерационного расчетного подбора значений  $P_0$  для фиксированных значений  $h$  (15, 100, 150, 200, 250 и 300 м) в соответствии с выражением  $\delta = P_0 / P_h$ .

Итерационные расчеты проводились до получения выходной скорости, соответствующей натурным условиям, с погрешностью около 2 % от измеряемой величины. Ориентировочные значения коэффициента  $\delta$  соответствия показаны на рис. 2 точками (ромбы — для объема воздушной плоскости ГДС ( $V_{\text{вп}}$ )  $0,12 \text{ м}^3$ ; квадраты —  $0,18 \text{ м}^3$ ).

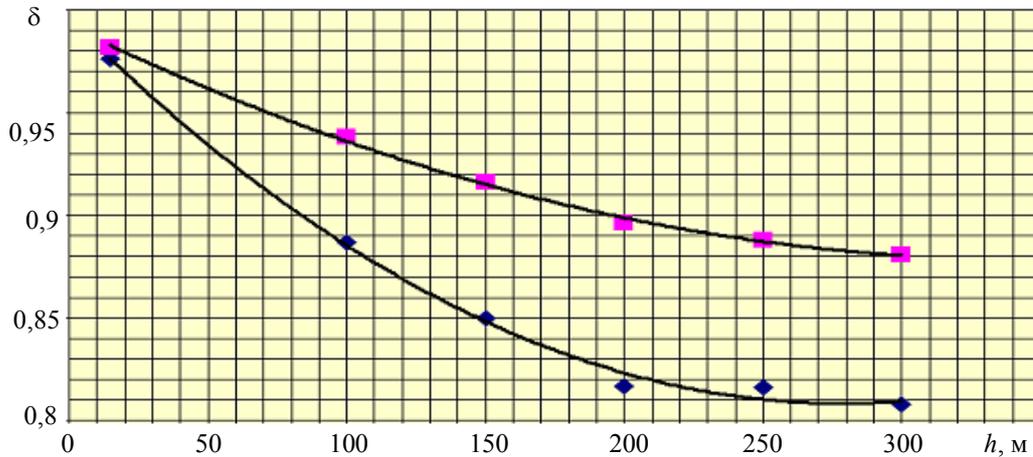


Рис. 2

Так как пользоваться дискретными зависимостями при отработке пусковых устройств ПА затруднительно, полученные ориентировочные фиксированные значения  $\delta$  были аппроксимированы квадратичными функциями, приведенными в виде сплошных кривых на рис. 2. Проверка обоснованности такой аппроксимации значений  $\delta$  выполнена путем расчетного сопоставления ожидаемых значений выходной скорости ПА  $v_{\text{вых}}$  на стенде с расчетными значениями выходной скорости в натуральных условиях (см. таблицу, здесь  $\Delta$  — расхождение расчетного значения с экспериментальным).

**Гидродинамические характеристики процесса пуска ПА**

$h$ , м	$V_{\text{вп}}$ , $\text{м}^3$	$\delta_{\text{апп}}$	$P_0$ , кПА	$v_{\text{вых}}$ , м/с	$\Delta$ , %
15	0,12	0,976	2,440	28,99	-1,2
100	0,12	0,887	9,976	27,92	-3,6
150	0,12	0,850	13,600	27,73	-2,6
200	0,12	0,817	17,157	26,67	-0,6
250	0,12	0,816	21,216	24,25	+0,6
300	0,12	0,808	25,048	21,43	+3,4
15	0,18	0,982	2,460	29,11	-0,8
100	0,18	0,938	10,320	28,12	-2,9
150	0,18	0,916	14,660	27,88	-2,1
200	0,18	0,896	18,820	26,62	-0,8
250	0,18	0,888	23,090	24,00	-0,4
300	0,18	0,881	27,310	20,88	+0,8

Анализ данных таблицы показывает, что работа на стенде с введением аппроксимированных значений коэффициента соответствия  $\delta_{\text{апп}}$  позволяет проводить наладочные испытания с получением фиксированной выходной скорости  $v_{\text{вых}}$ , близкой к полученной в натуральных условиях (максимальное расхождение между выходными скоростями ПА в натуральных условиях и

в условиях ГДС при  $V_{\text{вп}} = 0,12 \text{ м}^3$  не более 3,4 %). Для  $V_{\text{вп}} = 0,18 \text{ м}^3$  — не более 2,9 %, т.е. при увеличении габаритных характеристик ГДС соответствие натурным условиям улучшается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов О.И., Красильников А.В., Красильников Р.В.* Гидродинамический стенд. Заявка на изобретение № 2008147919, 2008. Положительное решение, 2010.
2. *Красильников Е.П.* Теоретические основы расчета корабельных систем воздуха высокого давления: Учеб. пособие. СПб: СПбГМТУ, 2007. 66 с.

#### *Сведения об авторах*

- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Антон Валентинович Красильников** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

---

---

# АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

---

---

УДК [621.7.07+621.9.07]:658.512.2

Е. А. СЕРКОВ

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРУППОВЫХ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Рассмотрен ряд направлений автоматизации проектирования технологической оснастки, в частности, групповых приспособлений. Приведен пример построения станочного силового механизма зажимного устройства с использованием программы приложения SolidWorks. Описан вариант методики проектирования групповых приспособлений в SolidWorks.

*Ключевые слова:* автоматизация, проектирование, групповое приспособление, методика, SolidWorks.

В настоящее время происходит сокращение жизненного цикла изделий. Поэтому сокращение продолжительности и снижение стоимости технологической подготовки производства (ТПП), в частности, проектирование станочных приспособлений — это один из путей получения преимуществ в конкурентной борьбе.

Современные САД-системы позволяют проектировать изделия вне зависимости от их функционального назначения. Однако задачи ТПП имеют очень важную особенность — они требуют максимально возможной унификации и могут быть решены путем создания комплексных деталей, для которых проектируются унифицированные (групповые) технологические процессы. Применительно к задачам унификации оснастки таким решением может стать создание комплексной заготовки, используемой при компоновке приспособлений.

Другое направление унификации при проектировании групповых приспособлений — использование инструментов трехмерного параметрического моделирования САД-систем для решения ряда однотипных задач при разработке сменных элементов групповых приспособлений.

И, наконец, существует еще одно направление унификации при решении задач проектирования приспособлений (в том числе и групповых) — разработка специализированных приложений, адаптированных к условиям конкретного предприятия. В качестве примера разработки специализированного приложения рассмотрим решение задачи проектирования зажимных устройств приспособления. Она состоит из ряда подзадач, в частности выбора типа зажимного устройства и силового механизма, а также определения необходимого исходного усилия, создаваемого приводом зажимного устройства,  $Q$ .

В справочной литературе [см. лит.] приведен ряд типовых конструктивных схем силовых механизмов устройств, в которых математическими выражениями задана связь между усилием зажима  $P$ , передаваемым на заготовку, исходным усилием  $Q$  и конструктивными параметрами силового механизма, который передает усилие от привода заготовке.

Для типовой схемы задача конструктора является формализованной и, следовательно, легко поддающейся автоматизации.

- При расчете зажимного устройства конструктор может сталкиваться с двумя типами задач:
- 1) прямая — выбор параметров силового механизма и расчет исходного усилия  $Q$ ;
  - 2) обратная — подбор параметров силового механизма по заданным значениям  $Q$  и  $P$ .

В качестве примера в общих чертах рассмотрим последовательность решения обратной задачи и построения трехмерной модели прихвата, входящего в силовой механизм, которая принципиально может быть реализована с помощью приложения, разработанного для SolidWorks. Вариант возможного интерфейса такого приложения представлен на рисунках.

На первом этапе происходит выбор схемы силового механизма и ввод значений зажимного усилия и исходного усилия (рис. 1). По этим значениям на следующем этапе производится подбор конструктивных параметров прихвата. При этом возможно использовать группу стандартных прихватов, удовлетворяющих исходным данным, либо подобрать и рассчитать конструктивные параметры прихвата в диалоговом режиме с конструктором (рис. 2).

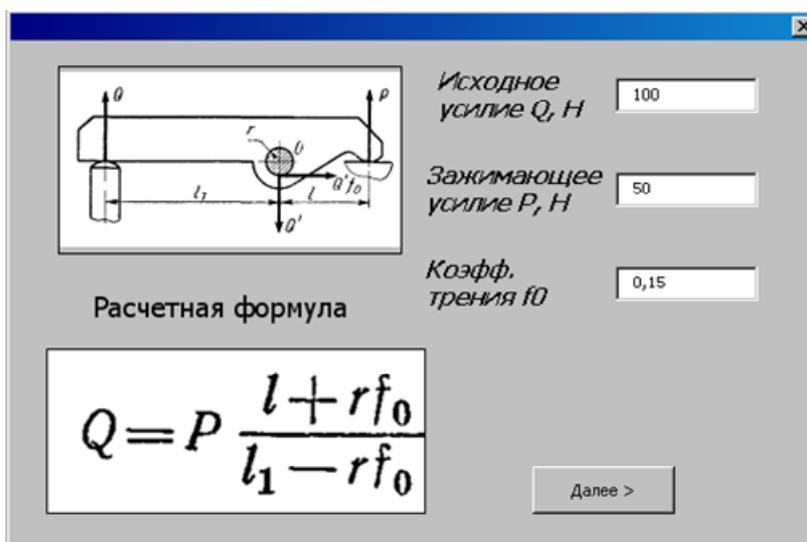


Рис. 1

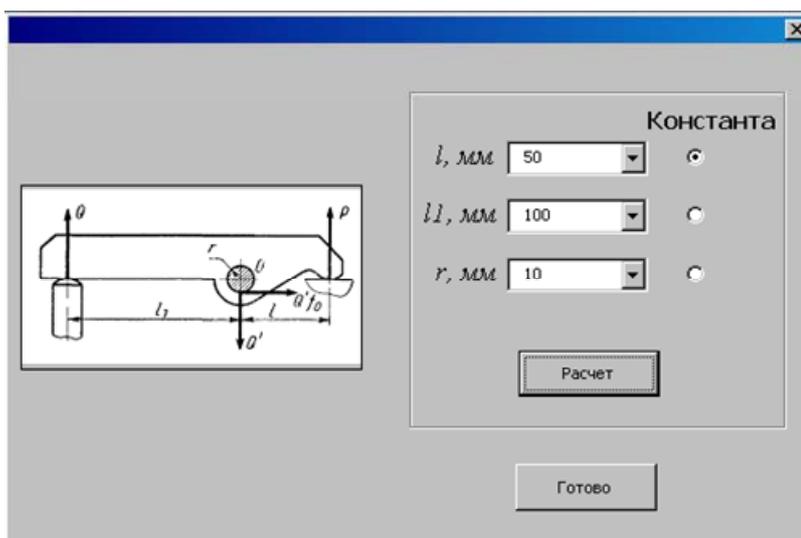


Рис. 2

После выбора одного из стандартных прихватов либо расчета параметров специализированного происходит автоматическая генерация его трехмерной модели.

Далее приведем этапы проектирования группового приспособления в SolidWorks:

- 1) разработка трехмерной модели комплексной заготовки;
- 2) проектирование базовой части приспособления;

3) описание функциональных связей между элементами и параметрами конструкции трехмерной модели сборки приспособления;

4) оформление конструкторской документации на детали комплекта наладки для всех заготовок, входящих в группу.

Разработка трехмерной модели комплексной заготовки выполняется для частного случая — оснащаемая операция находится в конце маршрута обработки деталей (например, сверление и нарезание резьбы), поэтому для создания модели достаточно проанализировать комплект конструкторской документации на детали группы и при этом нет необходимости учитывать при компоновке припуски, снимаемые на дальнейших операциях. Создание модели происходит на основе таблицы параметров, которая представляет собой файл Excel, прикрепленный к файлу трехмерной модели. В столбцах таблицы перечислены группы параметров, относящиеся к каждому конструктивному элементу заготовки: размеры и его состояние визуального отображения (погашен/не погашен), зависящее от наличия этого элемента в заготовке, входящей в группу. В каждой строке таблицы содержатся все необходимые параметры отдельной заготовки.

Проектирование базовой части приспособления принципиально не отличается от традиционного подхода, когда вокруг заготовки располагаются конструктивные элементы приспособления и выполняются необходимые расчеты.

Задание функциональных связей трехмерной модели сборки приспособления заключается в том, что при компоновке определяется функциональная зависимость параметров сборки от параметров обрабатываемой в приспособлении заготовки. Изменять параметры сборки возможно, используя таблицу параметров сборки и управляющего эскиза.

Таблица параметров сборки также является файлом Excel, прикрепленным к трехмерной модели сборки (рис. 3). В ней содержатся все необходимые сведения о свойствах заготовки (взятые из таблицы параметров комплексной заготовки) и описана их связь с параметрами приспособления с помощью функций Excel. Конструктивные параметры для каждой из заготовок, входящих в группу, помещены в соответствующую строку таблицы. Такая строка соответствует отдельной конфигурации сборки приспособления. Используя такую таблицу, возможно быстро добавлять сведения о новых деталях и оперативно рассчитывать параметры сборки для каждой из деталей группы.

Погашение сопряжений и деталей комплекта наладки					Палец сменный (размеры)						
\$СОСТОЯНИЕ@Совпадение127	\$СОСТОЯНИЕ@Совпадение128	\$СОСТОЯНИЕ@Совпадение129	\$СОСТОЯНИЕ@7370-0001_001<1>	\$СОСТОЯНИЕ@7370-0001_002<1>	h@Управляющий эскиз	b@Управляющий эскиз	b1@Управляющий эскиз	b2@Управляющий эскиз	d@Управляющий эскиз	D1@Управляющий эскиз	Det@Управляющий эскиз
Непог	Пог	Пог	Реш	Реш	3,50	2,5	1,25	10,5	1,5	3	7,5
Пог	Непог	Пог	Реш	Реш	3,50	2,5	1,25	5,0	6,5	9	14,0
Пог	Непог	Пог	Реш	Реш	4,25	2,5	0,50	3,5	3,5	6	10,0
Непог	Пог	Пог	Реш	Реш	2,00	3,0	2,50	14,0	4,5	7	14,0
Непог	Пог	Пог	Реш	Реш	2,00	3,0	2,50	14,0	4,5	7	14,0

Рис. 3

Управляющий эскиз используется для задания размеров сменных элементов и отображения размеров комплексной заготовки, на нем условно изображены элементы деталей на-

ладки, которые могут быть изменены в зависимости от исходных данных. Размеры, представленные на управляющем эскизе, задаются таблицей параметров сборки. Изменение размеров деталей происходит автоматически вслед за изменениями на управляющем эскизе с помощью инструмента SolidWorks „Уравнения“.

После задания функциональных связей возможен быстрый выпуск конструкторской документации (КД) на сменные элементы приспособления. Это достигается за счет создания шаблонов чертежей, в которые затем вносятся минимальные изменения для каждой новой конфигурации приспособления, соответствующей обрабатываемой в приспособлении заготовке.

На рис. 4 представлена схема связи исходных данных с результатом проектирования.

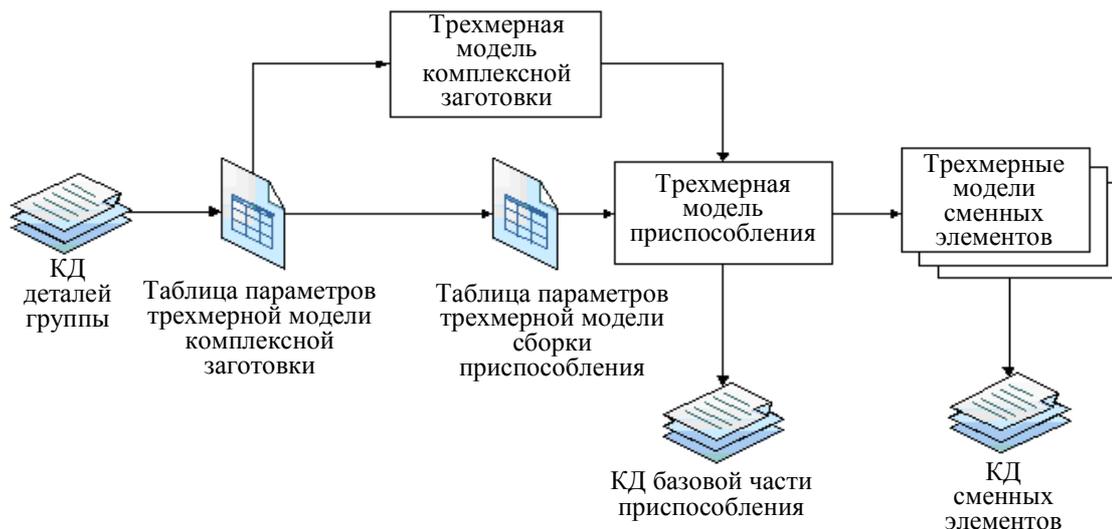


Рис. 4

В заключение можно сделать ряд выводов.

1. Рассмотренный подход к автоматизации проектирования зажимного устройства является общим для проектирования различных приспособлений, а не только групповых.
2. Возможно создавать библиотеки (или комплекс приложений) для проектирования типовых элементов приспособлений (например, приводов зажимных устройств).
3. Область наиболее эффективного применения рассмотренного варианта методики — проектирование групповых приспособлений для большой номенклатуры однотипных деталей, зачастую различающихся лишь габаритами.
4. Для рассмотренной методики автоматизации необходимо уточнение границ ее эффективного применения, а также дальнейшее совершенствование (в том числе подробное рассмотрение вопроса проектирования комплексной заготовки).
5. Методика универсальна, поэтому может найти применение в других областях, где требуется многократное решение однотипных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

Горошкин А. К. Приспособления для металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1979.

### Сведения об авторе

**Евгений Александрович Серков** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: ifmo\_serkov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

А. А. ГРИБОВСКИЙ, А. В. ПИРОГОВ, Е. Е. АЛЁШИНА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА НОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Рассматриваются задачи создания моделей изделия на основе исходного прототипа со сложной геометрией и анализа их точности. Описываются возможности использования моделей, полученных после трехмерного сканирования.

**Ключевые слова:** трехмерное сканирование, твердотельное моделирование, полигональная модель.

Одна из особенностей современного производства — тенденция к усложнению геометрии изделий и увеличению их номенклатуры. В связи с тем что не все изделия создаются на основе трехмерной модели, возникают сложности при их модификации. При работе с готовым продуктом, для которого отсутствует документация, требуется создание его виртуальной модели. Получить ее можно путем обмера с использованием трехмерных сканеров. Такая технология позволяет формировать модель в несколько раз быстрее и точнее по сравнению с традиционными технологиями, а для сложных изделий она является единственной возможностью получения корректной геометрии.

Современные системы, применяемые в приборостроении, работают на основе одного из трех принципов:

- точечная триангуляция (точечное сканирование);
- линейная триангуляция;
- интерференционное проецирование (оптические сканеры).

В зависимости от используемой технологии варьируются скорость формирования моделей и точность получаемой геометрии. Сравнение основных характеристик всех трех методов по пятибалльной шкале представлено в таблице.

Параметр	Метод		
	точечной триангуляции	линейной триангуляции	интерференционного проецирования
Точность	5	2	4
Скорость	1	3	5
Передача сложных поверхностей	1	4	4
Мобильность	2	5	4

В настоящей статье рассматривается система ATOS, использующая принцип интерференционного проецирования и обеспечивающая высокую скорость получения полигональной модели. Данная система была выбрана из-за сочетания высокой производительности и точности.

Для примера: скорость формирования поверхности для точечного измерения лежит в районе единиц—сотен точек за одно измерение, для лазерных сканеров — от тысяч до десятков тысяч, а для оптических систем — сотни тысяч—миллионы. Примерное время одного измерения для всех методов — 1 с.

Современные системы трехмерного сканирования позволяют формировать корректные модели с высокой степенью детализации за несколько часов. Однако к настоящему времени из-за особенностей полигональной структуры модели они получили распространение только в ряде областей, связанных с компьютерной графикой и проведением инженерного анализа.

При использовании оптического сканирования на изделие проецируются интерференционные линии, которые фиксируются двумя камерами, расположенными на трехмерном

сканере под определенным углом. После сопоставления с использованием специализированного программного обеспечения снимков, полученных с обеих камер, генерируются координаты точек на поверхности. Таким образом, по результатам сканирования формируется „облако“ точек, представляющее собой упорядоченное скопление сотен тысяч или миллионов точек (это скорее набор данных, чем модель в традиционном конструкторском понимании этого слова). Для работы с полученными данными в виде модели проводится операция полигонизации, которая заключается в соединении соседних точек в треугольники с минимально возможной длиной ребер.

Связи в полученных полигональных моделях можно разрушить без вмешательства в структуру соседних областей. При этом из моделей вычленяется треугольник, в результате чего нарушается замкнутость соответствующей поверхности. Из-за такой структуры связей невозможно произвести добавление или вычитание стандартных конструкторских примитивов, таких как отверстие или выступ. При попытке создать вырез будут удалены те треугольники, которые входят в зону выреза, что приведет к их „вырыванию“ из окружающих связей. Для получения точного выреза требуется модификация сопрягаемых элементов, что приводит к изменению структуры, ее перестройке и возможной деформации связей за границей выреза. Такие изменения могут вызвать погрешности, порой критичные для точности изготовления, и некорректные сдвиги триангулярной поверхности, приводящие к полной модификации модели. Особенности, столь критичные для конструирования, не играют значительной роли в компьютерной графике и анимации, для которой триангулярные поверхности давно стали стандартом де-факто, поэтому использование трехмерного сканирования в этой области и в смежных с ней областях не вызывает существенных сложностей и широко распространено.

Трехмерные модели, полученные с использованием объемного сканирования, могут применяться в приборостроении для таких задач, как:

- визуализация изделий;
- прототипирование — в данную задачу входит получение копий с использованием технологии быстрого прототипирования [1]. Системы, подобные Objet Eden 350v, напрямую работают с данными, получаемыми со сканера, и корректно выстраивают прототипы на их основе;
- анализ конструкции (включает измерение размеров, а также отклонений по форме);
- твердотельное моделирование (включает создание на основе полигональной модели твердого тела, к которому может быть применен весь набор инструментов CAD-моделирования);
- построение простейших примитивов, данный класс примитивов можно передавать в САД-системы через соответствующие интерфейсы.

Создание моделей с коренными изменениями в конструкции требует специализированных средств редактирования, предоставляемых САД-системами при работе с твердотельными объектами. Рынок трехмерного моделирования динамично развивается и быстро реагирует на возникающие проблемы, предоставляя средства для их решения как в виде отдельных продуктов, так и в виде модулей, интегрируемых в существующие программные продукты [2].

Для решения задачи построения твердотельного объекта на основе полигональной модели были предложены соответствующие средства [3]. Несмотря на разнообразие таких решений существует общая методика построения, включающая несколько этапов (рис. 1), которые позволяют получить модель оптимальным способом:

- определение характерных участков модели — изначально определяются те участки, которые требуют повышенной точности построения;
- определение границ кривизны;
- построение контуров на основе границ;

- создание патчей (патчи, представляющие собой переходные участки в областях большой протяженности, разделяют области с одинаковой кривизной на ряд участков);
- построение сетки на основе патчей [4].

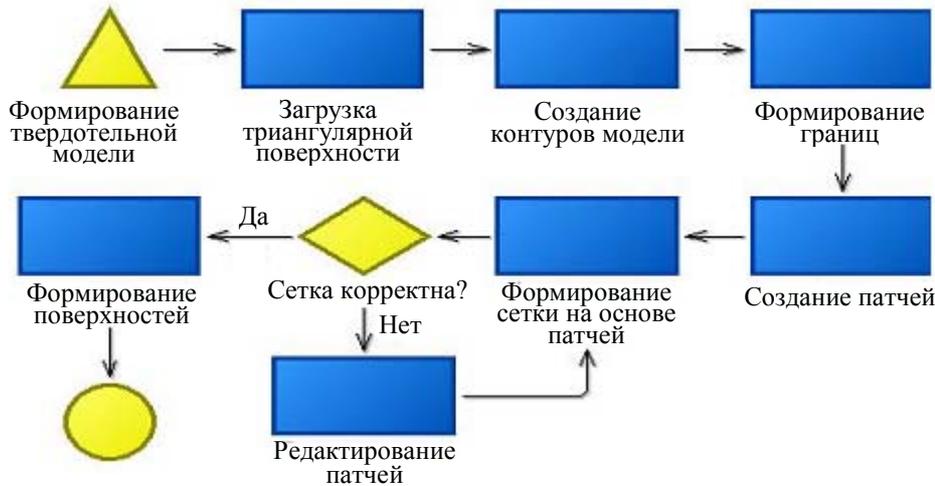


Рис. 1

В итоге формируется результирующая поверхность (так называемая CAD-поверхность), на основе которой строится твердое тело. Последовательность преобразования из полигональной модели в редактируемую CAD-модель представлена на рис. 2 (в полученной твердотельной модели в соответствии с эскизом был сделан вырез с использованием системы Catia).

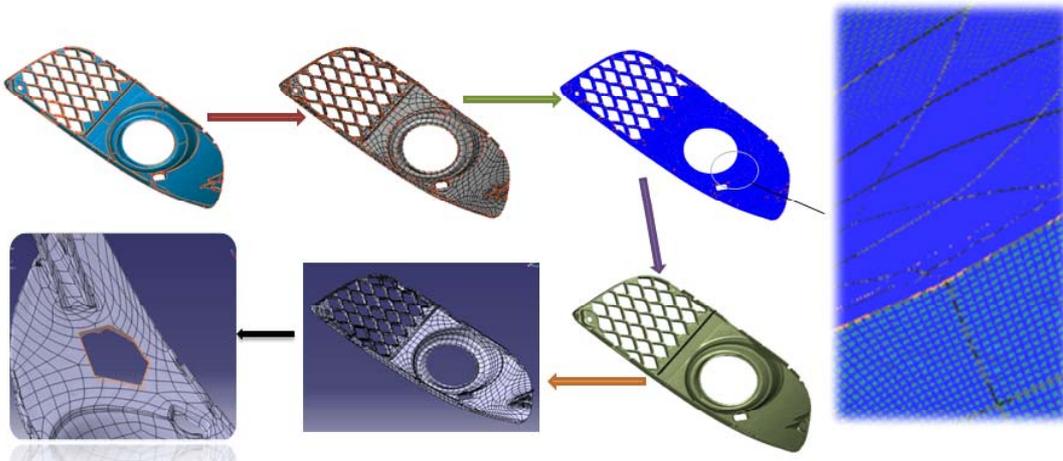


Рис. 2

Полученную модель можно использовать для написания управляющих программ, создания пресс-форм или литьевых форм для изготовления крупных партий деталей. При этом средства твердотельного моделирования, поддерживаемые в CAD-системах, позволяют формировать как принципиально новые конструкции, базирующиеся на исходной модели, так и объекты, которые будут сопрягаться с исходным по каким-либо поверхностям [5].

Анализ конструкции является неотъемлемой частью подготовки производства новых изделий. В простейшем случае это может быть сравнение полученной модели с ее прототипом, а для ответственных и сложных конструкций приходится прибегать к инструментам САЕ-систем. В связи с важностью данного направления на рис. 3 приводится пример контроля построенной модели в одной из систем анализа Geomagic Qualify, предоставляющей набор инструментов для контроля модели, построенной на основе полигональной поверхности [6]. В зависимости от степени автоматизации при построении модели и времени, затраченного на

данный процесс, формируется тело, более или менее приближенное к оригиналу. В результате проведенного анализа можно получить наглядное отображение тех участков, которые соответствуют или не соответствуют допустимым значениям отклонений.

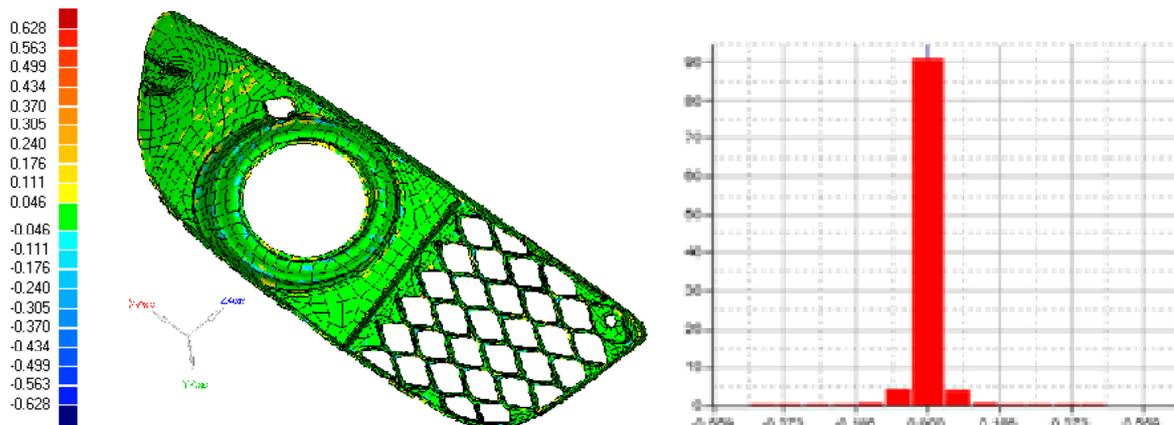


Рис. 3

Благодаря отображению всех отклонений в пространстве (трехмерное) или в конкретных сечениях (двумерное) можно быстро принять решение о целесообразности использования полученной модели.

На данный момент системы оптического сканирования, используемые совместно с соответствующим программным обеспечением, позволяют подготовить модели для решения широкого круга задач. Благодаря распространенной практике использования прототипов в новых разработках применение такого инструментария ускоряет выпуск технологической документации при сохранении эксплуатационных свойств изделия на высоком уровне.

Трехмерное сканирование изделий позволяет создать конкурентоспособную продукцию, а также предоставляет средства для контроля и поддержания ее качества на высоком уровне. Нами рассмотрена основная часть средств, позволяющих применять трехмерное сканирование при подготовке производства. В настоящее время использование оптических сканеров сводится к единичным случаям. Статья демонстрирует важность исследования данной области как одного из направлений ускорения подготовки производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зильбербург Л. И., Молочник В. И., Яблочников Е. И. Моделирование приборов, систем и производственных процессов. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 156 с.
2. Várady T., Michael A., Terék F., Terék Z. Automatic Extraction of Surface Structures in Digital Shape Reconstruction. // Geometric Modeling and Processing. Berlin — Heidelberg: Springer, 2006. Vol. 4077.
3. Cramblitt B. Mold Development with Digital Shape Sampling and Processing // MoldMaking Technology Insider. 2007.
4. Marks P. Capturing a Competitive Edge Through Digital Shape Sampling & Processing (DSSP) // The Society of Manufacturing Engineers. 2005.
5. Басов К. А. CATIA V5. Геометрическое моделирование. СПб: Питер, 2008. 270 с.
6. Binder J. Automating the inspection process // Aerospace America. 2006. October.

#### Сведения об авторах

**Андрей Александрович Грибовский** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: griandrey@yandex.ru

- Александр Владимирович Пирогов* — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: avpigr@mail.ru
- Екатерина Евгеньевна Алёшина* — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: aleshina.ekaterina@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
14.12.09 г.

УДК 621.3; 65.012.4

Ю. В. ФЕДОСОВ, С. Ф. СОБОЛЕВ

## ПОСТРОЕНИЕ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА В ЛАБОРАТОРИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Рассмотрены основные принципы работы учащихся в лаборатории поверхностного монтажа. Приведены примеры подхода к созданию модели обучения, а также рекомендации по выбору оборудования.

*Ключевые слова:* учебный процесс, производство печатных плат, технологический процесс.

В последнее время технологическое оборудование постоянно усложняется. Вследствие возрастающей сложности учащимся становится все труднее представить себе принципы его работы, особенно если они раньше не имели опыта общения с таким оборудованием. Также вследствие возрастающей сложности существующего оборудования увеличивается количество необходимых приемов и нюансов практической работы с ним, поэтому приходится изучать все больше и больше его особенностей, которые невозможно описать на лекциях: нужно непосредственно взаимодействовать с оборудованием, чтобы понять, как оно работает.

Если раньше процессы проектирования и производства изделия были несколько отделены друг от друга, то в настоящий момент все больше внедряется PDM-систем, обеспечивающих единую информационную среду предприятия, теснее увязывающих эти процессы. Таким образом, все службы и цеха предприятия работают в тесной взаимосвязи — данные САПР сразу передаются в цех, где на основе этих данных изготавливается новое изделие.

Если учащийся планирует по окончании института работать на современном предприятии, то сами условия производства диктуют необходимость изучения всех предметов в комплексе: процесса проектирования и процесса изготовления. Таким образом, чтобы студент лучше понимал процессы, которые лежат в основе изготовления изделий, он должен понимать все способы взаимодействия программного обеспечения и оборудования, а также те способы передачи данных, которые имеются на современном предприятии.

Можно отметить тенденцию к развитию у учащихся единой точки зрения на производство, на обобщение уже имеющихся у них знаний о производстве и генерирование новых в процессе обучения.

В имеющихся условиях возникает возможность более тщательного, продуманного контроля процесса обучения. Возникает возможность отслеживать не только то, как студент работает на лекциях, не только то, как проявляет себя на практических занятиях, но и как он применяет полученные в процессе обучения навыки применительно к конкретным производственным условиям. Соответственно критериев для оценки деятельности учащегося становится больше.

Возникает более качественный подход к оценке — учитывается работа на практических занятиях. Убираются формальные рамки разделения занятий на лекции и на практику, все изучается в совокупности, и процесс оценки становится таким образом более продуманным. Становится легче отслеживать объем работ, выполняемых учащимися, работа сводится не только к какой-то обязательной, формальной части, также можно видеть, насколько студент хорошо работает, сколько времени ему нужно для усвоения материала. В новых условиях необходимо понимать, что разным учащимся необходимо различное количество времени.

Отчетность, которая может быть получена по результатам занятий, должна формироваться более централизованно, поскольку рабочее место каждого студента оснащено компьютером, подключенным к Интернету.

Поскольку работа учащихся осуществляется на современном промышленном оборудовании, практически исключено неверное или неполное усвоение материала. В рамках научно-исследовательских работ, которые могут проводиться в Университете, лаборатория поверхностного монтажа может принимать участие как один из исполнителей, выступая в роли изготовителя разработанных и спроектированных изделий. Фактически учащиеся смогут своими силами разрабатывать новые изделия, новые конструкции, применять те знания, которые были ими приобретены [1, 2].

Лаборатория оснащена соответствующим оборудованием: печью конвекционного оплавления, роботом (устройством установки компонентов), устройством для нанесения паяльной пасты (трафаретным принтером), устройством для контроля и настройки изготовленных изделий. Весь комплект оборудования позволяет в сжатые сроки изготовить в данной лаборатории опытный образец изделия в рамках проводимых университетом работ.

Рассмотрим оборудование подробнее. Выбор робота-установщика компонентов обусловлен количеством необходимых компонентов, их производительностью и предполагаемыми размерами изделий, с которыми предстоит работать. Также следует обратить внимание на такие важные моменты, как энергопотребление, то, насколько экологичным является оборудование, и дополнительные условия для его функционирования, например, снабжение сжатым воздухом. В качестве такого оборудования на кафедре ТПС установлен автоматический манипулятор Mechatronika M60.

Автомат Mechatronika M60 (рис. 1) относится к профессиональному оборудованию, предназначенному для сборки печатных плат. Данный автомат оптимально подходит для производственных участков с малой площадью и небольшими объемами выпуска продукции. Благодаря использованию магнитных энкодеров SONY оборудование имеет хорошую точность и позволяет устанавливать компоненты, в частности, 0402, 30X30 и др. с шагом 0,5 мм, с производительностью 2000—2800 компонентов в час. Автомат оснащен дозатором, что позволяет работать без трафаретного принтера, он идеально подходит для мелкосерийного и серийного производства.

Автомат оснащен блоком автоматических питателей, размеры устанавливаемых плат печатного монтажа 300×500 мм, точность размещения компонентов 0,1 мм, установлена видеокамера для автоматического распознавания реперных знаков.

Программное управление позволяет быстро создавать программы „вручную“ или транслировать их из CAD-программ. Технологическое оборудование Mechatronika зарекомендовало себя как высоконадежное и безотказное. В связи с надежностью данного оборудования гарантийный период составляет два года. Таким образом, данный манипулятор вполне подходит для решения необходимого круга задач.



Рис. 1

Объем ванны для ультразвуковой отмывки должен быть достаточным, также должна быть предусмотрена возможность утилизации отходов этой ванны. В качестве такой ванны можно выбрать ванну ультразвуковой отмывки m03m компании FinnSonic. Ванна предназначена для промывки готовых изделий с возможностью загрузки изделий объемом до 150×100×70 мм. Для нанесения пасты необходим принтер трафаретной печати, в частности, можно отметить ручной принтер трафаретной печати Uniprint-M.

Печь, используемая для опытных работ, должна быть достаточного объема, с возможностью контроля термопрофиля для работы в широком диапазоне изделий. В качестве такой печи можно остановиться на настольной печи конвекционного оплавления паяльной пасты SEF 548.04G (рис. 2).



Рис. 2

Технические характеристики печи следующие: ширина конвейера 180 мм, скорость передвижения конвейера 100—600 мм в минуту, максимальная температура нагрева 270 °С, интерфейс USB 1.1, длина камеры 600 мм. К печи подключен компьютер и установлена программа для задания термопрофиля для оплавления паяльной пасты на платах.

Устройство для контроля готовых изделий должно обладать хорошим разрешением, чтобы предоставить возможность детального контроля цепей и иметь эффективное энергопотребление. В качестве устройства для контроля можно выбрать стереоувеличитель Mantis Elite, который представляет собой настольный штатив с установленной на нем оптической системой со сменными объективами четырехкратного увеличения. В конструкции стереоувеличителя предусмотрена подсветка контролируемого изделия.

В заключение стоит отметить важность и эффективность совмещения в учебном процессе знакомства с современным автоматизированным оборудованием для поверхностного монтажа и программным обеспечением для проектирования и производства печатных плат. Также при выборе оборудования следует руководствоваться вопросами энергопотребления, эргономики, доступности технического обслуживания и возможности послегарантийного обслуживания оборудования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сускин В. В.* Основы технологии поверхностного монтажа. Рязань: Изд-во Узорочье, 2001. 160 с.
2. *Соболев С. Ф.* Технология электромонтажа. Методические указания по разработке курсового проекта и подготовки к занятиям по технологии электромонтажа. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 88 с.

- Юрий Валерьевич Федосов** — *Сведения об авторах*  
 ЗАО „Морские Навигационные системы“, Санкт-Петербург; инженер;  
 E-mail: yf01@yandex.ru
- Сергей Фёдорович Соболев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: tps-ssf@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
 технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
 14.12.09 г.

УДК 681.5

В. Д. ЧЕРТОВСКОЙ

## АДАПТИВНОЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА

Динамичность спроса в процессе функционирования системы управления требует перехода к адаптивному планированию. Предложен подход к описанию процесса адаптивного планирования, позволяющий не только исследовать динамику процесса, но и оценить целесообразность перехода к выпуску новой продукции. Теоретические положения подтверждены результатами прикладной компьютерной реализации.

**Ключевые слова:** адаптивное планирование, производство, динамичность, метод.

**Введение.** Настоящая работа является теоретико-прикладным развитием концепций гибких автоматизированных заводов [1] и ERP-систем.

Рассматривается серийное производство, для которого справедливо условие

$$N_j[t_i] = [t_i] / [t_j] \gg 1,$$

где  $N_j[t_i]$  — количество продукции вида  $j$ , выпущенной за минимальный интервал времени моделирования  $[t_i]$ ;  $[t_j]$  — время изготовления единицы продукции вида  $j$ ,  $j = \overline{1, J}$ .

Современные производства функционируют в рыночной среде с динамично развивающимися характеристиками (цена, ресурсное обеспечение, спрос) [1—3]. В общем случае законы изменения спроса удобно представить как систему скачков

$$\mathbf{R}_3(t) = \mathbf{R}_{3\text{ст}} + \Delta\mathbf{R}_3 \cdot 1(t - \theta), \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_4(t) = \Delta\mathbf{R}_4 \cdot 1(t - \theta), \quad (2)$$

где  $\mathbf{R} = (\mathbf{R}_3, \mathbf{R}_4)$  — векторы спроса на уже выпускаемую (старую) и новую продукцию (значения  $\mathbf{R}_1$  и  $\mathbf{R}_2$  не меняются и поэтому не учитываются);  $\Delta\mathbf{R}_3, \Delta\mathbf{R}_4$  — изменение величины векторов;  $\mathbf{R}_{3\text{ст}}$  — постоянная величина;  $1(t)$  — единичная функция;  $\theta$  — сдвиг во времени.

Воздействия вида (1) характерны для традиционных систем управления. В то же время воздействия вида (2) связаны с изменением извне состава вектора цели в процессе функционирования системы, поэтому необходимо использовать адаптивное планирование, исследованию которого посвящена настоящая работа.

**Постановка задачи.** На рис. 1 схематически показана разница между традиционным и адаптивным планированием.

В традиционном процессе план рассчитывается заранее в точке *A* и реализуется через значительный промежуток времени в точке *B*. Инерционностью планирования в этом случае можно пренебречь.



Рис. 1

Адаптивное планирование осуществляется в процессе функционирования системы. При появлении спроса на новую продукцию *C* (см. рис. 1) расчет и реализация нового плана должны начаться незамедлительно в точке *D*. В этом случае инерционность процесса планирования уже нельзя не учитывать.

Все виды продукции (план выпуска) разделим на четыре группы  $P_1$ — $P_4$ . Виды продукции  $P_4[\tau]$  и  $P_3[\tau]$ ,  $P_3[\tau]$  и  $P_2[\tau]$  имеют (попарно) общие ресурсы и не имеют общих ресурсов с продукцией  $P_1[\tau]$ . Изменяется  $P_4$  и как следствие —  $P_3$  и  $P_2$ , а  $P_1$  остается без изменения и поэтому далее не рассматривается.

**Решение задачи.** Для математического описания процесса адаптивного планирования удобен (рис. 2) метод динамического линейного программирования (ДЛП):

$$P(T) \geq R(T), \tag{3}$$

$$P(t) = P(t - 1) + p(t), \quad P(0) = P_0, \tag{4}$$

$$z(t) = Az(t) + Bp_1(t), \quad z(0) = z_0, \tag{5}$$

$$p(t) = Cz(t), \tag{6}$$

$$Dp_1(t) \leq b(t), \tag{7}$$

$$G = - \langle F, P(T) \rangle \rightarrow \min, \tag{8}$$

где  $z, p$  — векторы незавершенного производства и ежедневного плана,  $p_1$  — вектор запуска комплектов материалов в производство;  $D$  — матрица норм расходов,  $b$  — вектор наличного количества ресурсов;  $P$  — вектор плана с накоплением,  $F$  — вектор прибыли от выпуска единицы продукции,  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  — скалярное произведение;  $A, B, C$  — матрицы соответствующей размерности;  $t$  — минимальный интервал времени;  $T$  — время моделирования;  $G$  — целевая функция, соответствующая прибыли;  $p(t) = \overline{\Psi}$  — вектор текущего плана;  $\psi = \overline{\Psi}$  — вид ресурса.

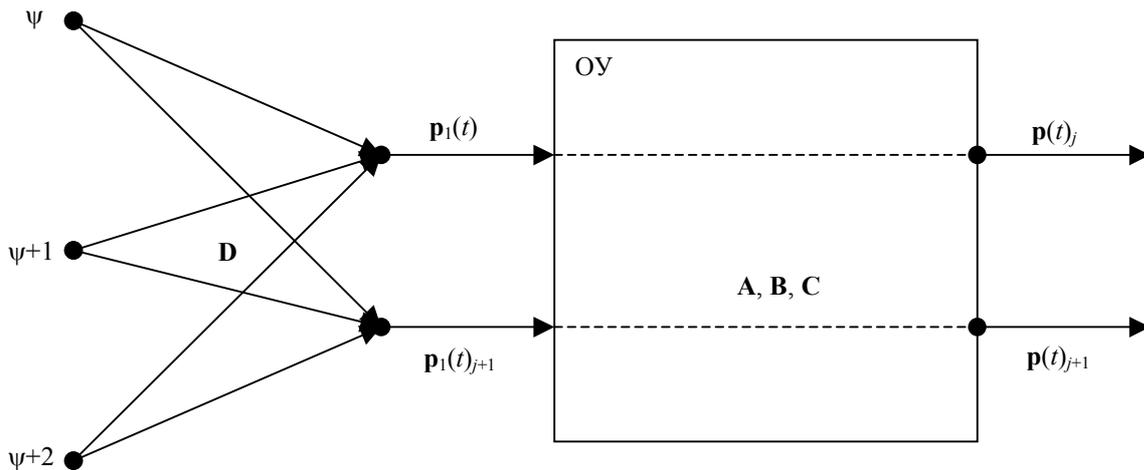


Рис. 2

Нетрудно заметить, что частный случай  $p_1(t) = p(t)$  описывает традиционное статическое оптимальное планирование:

$$P(T) \geq R(T), \quad DP(T) \leq b(0), \quad G = - \langle F, P(T) \rangle \rightarrow \min. \tag{9}$$

Положим, что задача (3)—(8) имеет решение, позволяющее оценить целесообразность перехода к выпуску новой продукции.

На рис. 3 проиллюстрировано изменение состава вектора цели и возможных вариантов реакции системы на эти изменения. Здесь спрос на новую продукцию обозначен как  $P_4$ . Выпуск новой продукции может сопровождаться снижением спроса на старую продукцию с величины  $R_3$  до  $R'_3$  (см. рис. 3, в).

Возможны следующие варианты запуска новой продукции (рис. 3, а, б):

- 1) последовательный непрерывный с выпуском продукции через время  $T$  (кривая 4);
- 2) последовательный непрерывный (только после снятия старой продукции) с мгновенным выпуском (3).
- 3) параллельный скачкообразный в процессе снятия старой продукции (2);
- 4) параллельный инерционный в процессе снятия старой продукции (1).

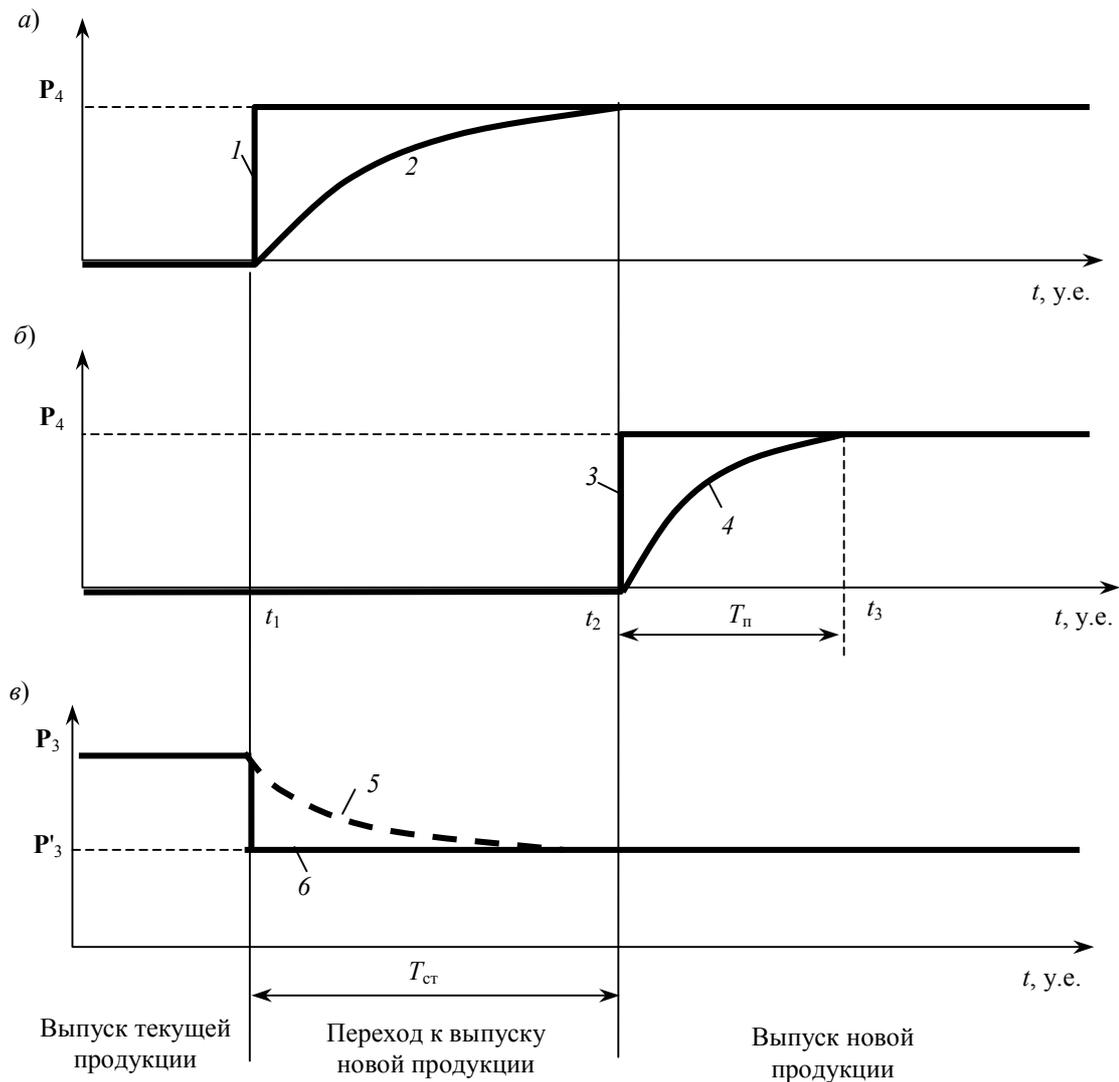


Рис. 3

Возможны два варианта снятия текущей продукции с производства.

А. Мгновенный (кривая б, рис. 3, в,  $T_{ct} = 0$ ) до величины  $P'_3 \leq P_3$ . Здесь справедливы ранее перечисленные варианты и удобно говорить о случаях А1—А4.

Б. Постепенный за время  $T_{ct} = \tau_3 = \max_j t_3$ , где  $t_3 = \{\tau_{3j}, j \in J_3 \subset J\}$ ,  $J, J_3$  — множества текущей продукции (кривая 5 на рис. 3, в), характеризуется случаями Б1—Б3.

На выходе объекта управления фиксируется выпуск готовой продукции  $j$  ( $j = \overline{1, J}$ ), на входе имеют место соответствующие комплекты ресурсов, готовые для запуска в производство. Полагаем, что процесс комплектования выполнен до начала производства (см. рис. 2).

Чтобы перейти от старого плана (со старыми связями) к новому, необходимо определить новый план (с новыми структурными связями).

Пусть в момент времени  $(t) = (\tau - 1) = 0$  возникает необходимость в оперативном переходе на выпуск новой продукции  $\mathbf{P}_4[\tau] = \{\mathbf{P}_{4j}[\tau], j = \overline{1, J_4}\}$ . При этом старая продукция  $\mathbf{P}_3[\tau]$  снимается с производства полностью ( $\mathbf{P}'_3[\tau] = 0$ ) или частично ( $\mathbf{P}'_3[\tau] < \mathbf{P}_3[\tau]$ ). Пусть матрица  $\mathbf{D}$  норм расходов разрежена, что имеет место в задачах большой размерности.

Очевидно, что старый план  $\mathbf{P}_{\text{ст}}[\tau] = \{\mathbf{P}_1^T[\tau], \mathbf{P}_2^T[\tau], \mathbf{P}_3^T[\tau]\}^T$ ,  $|\mathbf{P}_{\text{ст}}| = |\mathbf{P}_1| + |\mathbf{P}_2| + |\mathbf{P}_3|$ , где  $|\cdot|$  — размерность вектора,  $\mathbf{b}_{\text{ст}}^T(\tau - 1) = \{\mathbf{b}_1^T(\tau - 1), \mathbf{b}_2^T(\tau - 1), \mathbf{b}_3^T(\tau - 1)\}^T$ ,  $\mathbf{C}_{\text{ст}} = \{C_i, i = 1, 3\}$ . Для выпуска новой продукции (обозначено „штрихом“) выделяются дополнительные ресурсы  $\mathbf{b}_4(\tau - 1)$ ,  $\mathbf{b}'_3(\tau - 1)$ ,  $\mathbf{b}'_2(\tau - 1)$ . Предполагаем, что наличие ресурсов  $\{\mathbf{b}_2(\tau - 1) + \mathbf{b}'_2(\tau - 1)\}$ ,  $\{\mathbf{b}_3(\tau - 1) + \mathbf{b}'_3(\tau - 1)\}$ ,  $\mathbf{b}_4(\tau - 1)$  обеспечивает выполнение нового плана  $\mathbf{P}_{\text{н}}^T[\tau] = \{\mathbf{P}_1^T[\tau], \mathbf{P}_2^T[\tau], \mathbf{P}_3^T[\tau], \mathbf{P}_4^T[\tau]\}^T$  при  $\mathbf{P}_4[\tau] \geq \mathbf{R}_4[\tau]$ , иначе следует решить вопрос ресурсного обеспечения.

Поскольку часто  $|\mathbf{P}_4| \ll |\mathbf{P}|$ ,  $|\mathbf{P}_3| \ll |\mathbf{P}|$ , то возможно существенное снижение размерности (а следовательно, и времени расчета) задачи.

Основная идея формирования модели нового плана — запись процесса в отклонениях от известного старого плана.

Вычтя из неравенств (9) для  $\mathbf{P}_{\text{н}}[\tau]$  новой продукции равенства (9) для  $\mathbf{P}_{\text{ст}}[\tau]$  старой продукции, получим выражение

$$\begin{pmatrix} \mathbf{D}_6 & 0 \\ \mathbf{D}_9 & \mathbf{D}_{11} \\ 0 & \mathbf{D}_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \|\mathbf{P}'_3[\tau] - \mathbf{P}_3[\tau]\| \\ \mathbf{P}_4[\tau] \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} \|\mathbf{b}'_2(\tau - 1)\| \\ \|\mathbf{b}'_3(\tau - 1)\| \\ \|\mathbf{b}'_4(\tau - 1)\| \end{pmatrix} \quad (10)$$

в отклонениях для нового плана с неизвестными значениями  $\mathbf{P}_4[\tau]$  и  $\mathbf{P}'_3[\tau]$ , где  $\mathbf{D}_6$ ,  $\mathbf{D}_9$ ,  $\mathbf{D}_{11}$ ,  $\mathbf{D}_{12}$  — подматрицы соответствующей размерности матрицы  $\mathbf{D}$  норм расхода ресурсов. Очевидно, что выгода от выпуска новой продукции определяется выражением

$$G_4 = \langle \mathbf{F}_4, \mathbf{P}_4(T - \theta) \rangle, \quad (11)$$

где  $\theta = t_2$  для вариантов 3 и 4,  $\theta = t_1$  — для вариантов 1 и 2. Величина  $\mathbf{P}_4(T - \theta)$  определяется из выражения (4), в котором из соотношений (5) и (6) в одномерном случае

$$a_4 dp_4(t)/dt + p_4(t) = p_{14}(t), \quad a_4 = T_{\text{п}}/3 \quad (12)$$

для вариантов Б1 и Б3

$$p_4(t) = p_4 1(t - \theta) \quad (13)$$

для вариантов А2 и А4 ( $a$  — постоянная времени).

Нетрудно заметить, что варианты А2 и А4 удобно использовать для предварительной оценки, а точную оценку следует проводить с вариантами Б1 и Б3.

Отметим, что в случаях Б1—Б3 величина  $\Delta F_3$  потерь от незавершенного производства продукции равна нулю. Для случаев А1—А4

$$\Delta F_3 = \langle \mathbf{F}_3, \mathbf{P}_3(t - t_1) \rangle, \quad (14)$$

где в одномерном случае

$$\begin{aligned} p_3(t) &= p_3 - \{p_3 - p'_3\} \{1 - \exp(-t/a_3)\} = p'_3 \{1 - \exp(-t/a_3)\} + p'_3 \exp(-t/a_3) = \\ &= \{p_3 - p'_3\} \exp(-t/a_3) + p'_3, \quad a_3 = T_{\text{ст}}/3. \end{aligned} \quad (15)$$

В этих случаях формальным условием для экономической целесообразности перехода на выпуск новой продукции является

$$\Delta F_3 \leq G_4. \quad (16)$$

Соотношения (10)—(16) составляют фактически математическую модель процесса составления нового плана, для чего возможно использовать методы нахождения старого плана.

Таким образом, показано, что расчет в адаптивном режиме в первом приближении можно свести к некоторому эквивалентному расчету в стационарном режиме. Использование динамического линейного программирования позволяет более точно учитывать экономические характеристики процесса планирования.

Можно отметить, что предлагаемое математическое описание позволяет учесть и изменения  $\mathbf{P}_3[\tau]$  при  $\mathbf{P}_4[\tau] = 0$ .

Задача ДЛП (3)—(8) может быть сведена к задаче статистического линейного программирования вила

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t-1) + \mathbf{p}(t), \quad \mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0, \quad (17)$$

$$\mathbf{P}(T) \geq \mathbf{R}(T), \quad (18)$$

$$\mathbf{D}\mathbf{p}(t) \leq \mathbf{b}(t), \quad (19)$$

$$G = -\langle \mathbf{F}, (\mathbf{A}^K \mathbf{B})\mathbf{P}(T) \rangle \rightarrow \max, \quad (20)$$

где  $(\mathbf{A}^K \mathbf{B}) = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^{T-1} & \mathbf{B} & \mathbf{A}^{T-2} & \mathbf{B} & \dots & \mathbf{A} \mathbf{B} & \mathbf{B} \end{pmatrix}$ .

Для последней задачи важны свойства ресурсного обеспечения и векторной оптимизация.

**Ресурсное обеспечение.** Задача ресурсного обеспечения плана (и прежде всего ограничения снизу спроса  $R_j^-, j = \overline{1, J}$ ) с математической точки зрения означает выполнение второго этапа решения задачи линейного программирования (ЛП) — нахождение допустимых решений, т.е. совместности системы ограничений.

Наиболее часто система неравенств высокой размерности задачи ЛП является несовместной, т.е. спрос  $\mathbf{R}$  не обеспечивается необходимыми ресурсами.

Необходимо, следовательно, определить условия, гарантирующие совместность системы неравенств. Здесь возможны случаи: определение плана  $\mathbf{P}^+[T] < \mathbf{P}[T] < \mathbf{R}^-[T]$ , который может быть выполнен при имеющихся ресурсах; определение минимального дополнительного количества ресурсов  $\Delta \mathbf{b}(0)$ , позволяющих выполнить заказ  $\mathbf{R}^-[T]$ .

Необходимо решать дополнительную задачу линейного программирования

$$\mathbf{P}[T] + \Delta \mathbf{R}^-[T] \geq \mathbf{R}^-[T], \quad \mathbf{A}\mathbf{P}[T] \leq \mathbf{b}(0) + \Delta \mathbf{b}(0),$$

$$G = \langle \mathbf{F}, \Delta \mathbf{R}^-[T] \rangle + \langle \mathbf{H}, \Delta \mathbf{b}(0) \rangle \rightarrow \min,$$

где  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{H}$  — стоимостные веса или веса, приводящие разноразмерные величины к одной размерности.

**Векторный критерий.** Использование только одной целевой функции характеризуется получением „крайних“ решений, не учитывающих в достаточной мере факторов, имеющих место в реальной системе. Для „сглаживания“ этих крайностей используется векторная целевая функция (многокритериальная постановка задачи). Учет  $L$  критериев сводится в конечном итоге к неформальному выбору схемы компромисса — сворачиванию векторного критерия  $G_l$  ( $l = \overline{1, L}$ ) в скалярный  $G$  через веса  $\alpha_l$ :

$$G(\mathbf{P}^*[T]) = \sum_{l=1}^L \alpha_l G_l(\mathbf{P}^*[T]) \rightarrow \max, \quad \sum_{l=1}^L \alpha_l = 1, \quad \alpha_l \geq 0. \quad (21)$$

При использовании компьютерных расчетов предпочтение следует отдать группе методов, в которых веса определяются в процессе решения задачи.

В методе идеальной точки первоначально определяются оптимальные значения  $P_l^*[T]$  и  $G_{l\max}$  для отдельных  $l$ -х критериев, а затем решается задача

$$\mathbf{A}\mathbf{P}[T] \leq \mathbf{b}(0),$$

$$G(\mathbf{P}[T]) = \sum_{l=1}^L \{G_{l_{\max}} - G(\mathbf{P}[T])\}^2 \rightarrow \min,$$

где  $\mathbf{P}$  — компромиссное решение.

Задачи ДЛП всех уровней можно, как следует из выражений (17)—(20), свести к задачам статического линейного программирования. Следовательно, ДЛП позволяет решить вопрос согласования экономических интересов структурных элементов (цеха, подразделения). Вопрос координации динамических свойств элементов требуется решать путем моделирования.

**Компьютерная реализация.** Реализация соотношений (3)—(8) возможна двумя способами: интеграцией задачи статического линейного программирования и разностного уравнения, а также прямым моделированием на основе работы [4].

В первом случае для оперативной проверки теоретических положений на задачах небольшой размерности возможно использование пакета MatLab или интеграции пакета LINDO и СУБД InterBase. Во втором случае применяется СУБД InterBase. Ее использование в среде Delphi показало работоспособность. В настоящее время проводится тестирование достоверности решения задачи ДЛП (12), (13) на числовых примерах. Пример реализации в пакете MatLab представлен на рис. 4 (а — схема, б — результат моделирования процесса адаптивного планирования при переходе на выпуск новой продукции).

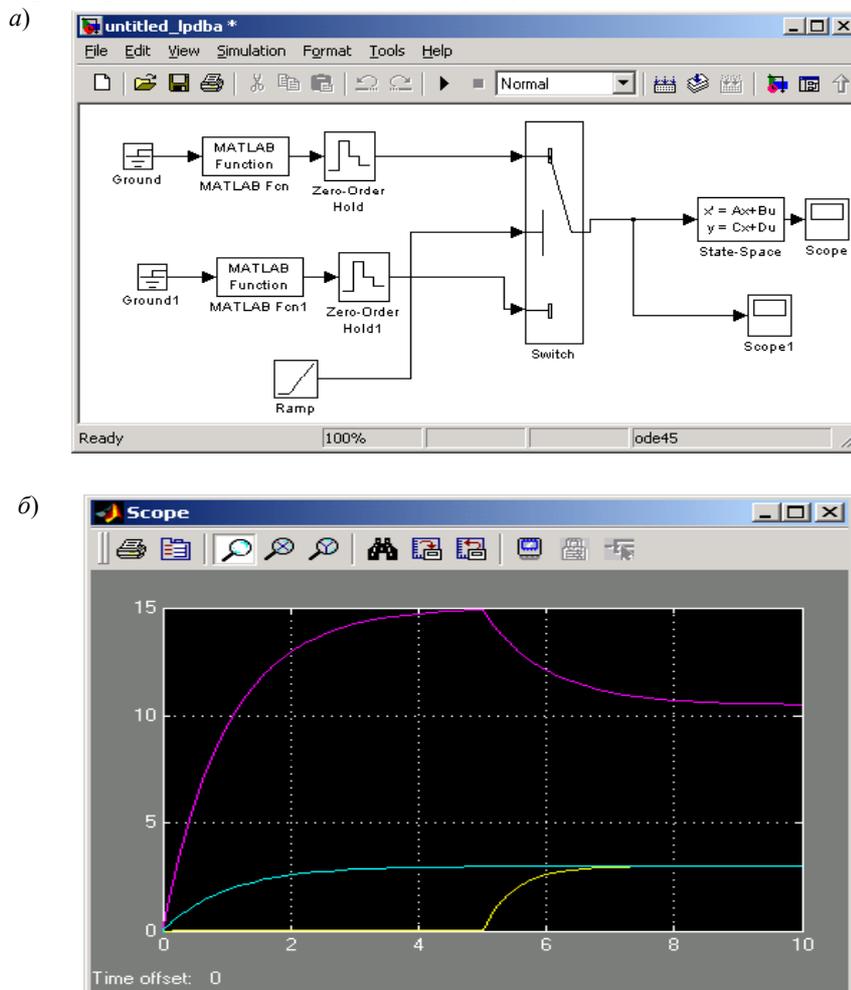


Рис. 4

**Заключение.** Рыночные отношения характеризуются изменением не только величины различных составляющих вектора спроса, но и состава самого вектора при переходе на выпуск новой продукции. В последнем случае требуется адаптивное планирование с учетом его инерционности.

Для описания процесса адаптивного планирования пригоден метод динамического линейного программирования.

Этот метод позволяет не только исследовать процесс, но и дать оценку целесообразности перехода на выпуск новой продукции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соломенцев Ю. М., Польшкалин В. Я., Чертовской В. Д. и др. Системное проектирование интегрированных АСУ ГПС машиностроения. М.: Машиностроение, 1988. 488 с.
2. Чертовской В. Д. Теоретические основы автоматизированного управления: процедурное представление. М.: МГУП, 2007. 218 с.
3. Чертовской В. Д. Интеллектуализация автоматизированного управления производством. СПб: Изд-во СПбГУ, 2007. 164 с.
4. Альсевич В. В., Габасов Р., Глушенков В. С. Оптимизация линейных экономических моделей. Статические задачи. Минск: БГУ, 2000. 210 с.

**Владимир Дмитриевич Чертовской**

#### *Сведения об авторе*

— профессор; Северо-Западный институт печати Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна; кафедра информационных и управляющих систем

Рекомендована кафедрой  
информационных и управляющих  
систем СЗИП

Поступила в редакцию  
19.11.08 г.

---

---

# ИНФОРМАЦИЯ

---

---

## СООБЩЕНИЕ О КОНКУРСЕ НАУЧНЫХ СТУДЕНЧЕСКИХ РАБОТ ПО РАЗДЕЛУ „ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ, ОПТИЧЕСКИЕ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ“ 2009 г.

В соответствии с приказом Министерства образования РФ от 5 сентября 2009 г. № 966 „О проведении открытого конкурса в 2009 г. на лучшую научную работу студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам“ Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) как базовый вуз провел конкурс по разделу „Оптико-электронные приборы и системы, оптические и лазерные технологии“.

В конкурсе приняли участие 87 научных работ 98 студентов, в том числе 7 студенческих коллективов, 74 научных руководителей из 32 вузов 22 городов России: Москвы, Санкт-Петербурга, Краснодара, Новосибирска, Твери, Самары, Ставрополя, Томска, Владимира, Воронежа, Чистополя, Кемерово, Коврова, Омска, Орла, Тулы, Саратова, Ульяновска, Екатеринбурга, Ростова-на-Дону, Таганрога, Ярославля.

Из представленных работ 9 имеют фундаментальный характер (из них 2 представлены к награждению медалями), 1 работа имеет методический характер, 9 — поисковый, 68 — прикладной (из них 2 представлены к награждению медалями, 8 — дипломами).

76 представленных работ выполнены в рамках учебного процесса, 11 работ — вне учебного плана.

59 из представленных на конкурс работ имеют ссылки на статьи из научных журналов, 17 — ссылки на патенты, 14 — ссылки на каталоги фирм и компаний, 23 — на стандарты РФ, в 40 работах упомянуты материалы сайтов сети Интернет. Авторы 76 работ использовали литературные источники последних 5 лет издания.

В числе авторов представленных работ 26 студентов 6-го курса (из них 1 автор представлен к награждению медалью, 4 — дипломами), 28 студентов — 5-го курса (из них 1 автор представлен к награждению медалью, 2 — дипломами), 29 студентов — 4-го курса (из них 1 автор представлен к награждению дипломом, 2 — медалями), 2 студента 2-го курса, 2 студента 3-го курса (из них 1 автор представлен к награждению дипломом).

48 руководителей представленных на конкурс научных работ имеют степень кандидата наук (2 из них — руководители работ, представленных к награждению медалью, 5 — руководители работ, представленных к награждению дипломами), 32 руководителя имеют степень доктора наук (2 из них — руководители работ, представленных к награждению дипломами), 17 руководителей ученых степеней не имеют (1 из них — руководитель работы, представленной к награждению дипломом, 2 из них — руководители работ, представленных к награждению медалями).

На конкурс поступили 23 работы, результаты которых опубликованы в открытой печати (авторы этих работ имеют в общей сложности 129 публикаций). Авторы работ, представленных к награждению медалями конкурса, имеют 46 публикаций, авторы работ, представленных к награждению дипломами конкурса, имеют 41 публикацию.

Предварительные результаты 23 работ апробированы на конференциях различного уровня с публикацией материалов докладов.

К награждению медалями конкурса представлены 4 научные работы студентов:

- Дорошкевича Антона Александровича (Томский государственный университет),
- Басько Натальи Сергеевны (Томский университет систем управления и радиоэлектроники),
- Никитина Анатолия Евгеньевича (Ярославский государственный университет имени П. Г. Демидова),
- Барабоновой Инны Александровны (Тверской государственный технический университет).

К награждению дипломами конкурса представлены 8 работ студентов следующих вузов:

- Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики,
- Орловского государственного технического университета,
- Томского университета систем управления и радиоэлектроники,
- Омского государственного технического университета,
- Кубанского государственного технологического университета,
- Новосибирского государственного университета,
- Санкт-Петербургского государственного политехнического университета,
- Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

Председатель конкурсной комиссии по разделу 12  
„Оптико-электронные приборы и комплексы,  
оптические и лазерные технологии“,  
проректор СПбГУ ИТМО по развитию  
*В. О. НИКИФОРОВ*

Ответственный секретарь  
конкурсной комиссии  
*С. С. ГВОЗДЕВ*

### К 100-летию со дня рождения В. В. Солодовникова

Владимир Викторович Солодовников (1910—1992) — основатель научно-педагогической школы МГТУ им. Н. Э. Баумана в области автоматического управления, выдающийся советский ученый, имеющий мировую известность, Заслуженный деятель науки и техники СССР, основатель кафедры систем автоматического управления МВТУ им. Н.Э. Баумана (1948 г.), Лауреат Государственной премии СССР (1972 г.).



Жизнь Владимира Викторовича с молодых лет была посвящена науке. В 1934 году он окончил Ленинградский физико-механический институт. В 1939 г., работая во Всесоюзном электротехническом институте им. В. И. Ленина, защитил кандидатскую, а в 1948 г., работая в Институте автоматики и телемеханики АН СССР (ныне Институт проблем управления РАН) — докторскую диссертации. В течение ряда лет был научным руководителем Центрального научно-исследовательского института комплексной автоматизации (ЦНИИКА).

В 1939—1941 гг. В. В. Солодовниковым было сформулировано понятие качества систем автоматического регулирования (САР) и поставлена проблема исследования качества при детерминированных воздействиях, даны исходные положения оригинального частотного метода решения этой проблемы.

С середины сороковых годов частотный метод анализа качества в работах В. В. Солодовникова получает дальнейшее развитие в математическом обосновании метода, установлении взаимосвязи частотного метода анализа качества с частотным методом анализа устойчивости, в распространении метода на широкий класс типовых воздействий и ненулевых начальных условий, а также на системы с распределенными и переменными параметрами. Этими работами было положено начало формированию нового раздела теории автоматического регулирования (ТАР) — анализ переходных процессов, вызываемых детерминированными воздействиями.

Наиболее полное развитие и завершение частотный метод получил в 1948—1952 гг. уже в рамках научной школы МВТУ им. Н.Э. Баумана. В тот период установлены свойства, критерии и предложены теоремы, позволяющие судить о качестве и характере переходного процесса непосредственно по частотным характеристикам, разработан метод трапецеидальных частотных характеристик для анализа и построения переходных процессов, разработаны и составлены таблицы переходных функций; разработан метод синтеза САР и их корректирующих устройств по заданным требованиям к запасу устойчивости и качеству регулирования.

За разработку частотного метода анализа динамики САР В.В. Солодовников был награжден премией Президиума АН СССР. Исследования по частотным методам в теории регулирования уже в 1950-х гг. выдвинули В. В. Солодовникова в число ведущих ученых нашей страны в области автоматического регулирования и управления. Итоги работы в этом направлении были изложены в монографии „Основы автоматического регулирования“ (1954 г.), издание которой сыграло большую роль в формировании и дальнейшем развитии теории и практики автоматического регулирования и управления и послужило основой для серии инженерных монографий „Техническая кибернетика“, „Теория автоматического регулирования“ (1967—1969 гг.). За эту работу в составе коллектива авторов В. В. Солодовников удостоен в 1972 г. Государственной премии СССР.

В. В. Солодовниковым на сессии АН СССР по научным проблемам автоматизации производства в 1956 г. впервые был определен принцип действия самонастраивающихся систем (СНС). Это была первая отечественная работа по аналитическим, или как их часто называют, беспоисковым СНС. Предложенная схема послужила началом для развития класса систем автоматического управления с оптимальной настраиваемой математической моделью (Аналитические самонастраивающиеся системы автоматического управления / Под ред. В. В. Солодовникова. 1965).

В начале 1960-х гг. на кафедре систем автоматического управления развернулись исследования, связанные с разработкой аналитических градиентных СНС управления с эталонными моделями. Были разработаны инженерные методы расчета и проектирования этого класса систем и исследованы возможности их применения для объектов различных классов с учетом нелинейности и нестационарности.

Будучи научным руководителем ЦНИИКА, В. В. Солодовников уже в конце 1950-х гг. заложил научные и технические основы комплексной автоматизации производства, его многочисленные работы, посвященные этому направлению, оказали большое влияние на дальнейшее развитие теории и практики автоматических и автоматизированных систем управления технологическими процессами и становление учебной специализации кафедры по промышленной автоматике.

В. В. Солодовников является автором целого ряда оригинальных технических разработок в области автоматики. Так, еще в 1940 г. им разработана первая установка, основанная на идее сопряжения математической модели с реальной аппаратурой; в период 1951—1953 гг. под его руководством разработаны первые в СССР электронные корреляторы, комплект вычислительных машин для статистического анализа.

За сорок лет руководства В. В. Солодовниковым основанной им кафедрой систем автоматического управления в МГТУ (1948—1988 гг.) сложилась признанная в стране университетская научно-педагогическая школа в области автоматического управления.

Работы кафедры, выполненные под руководством и при личном участии В. В. Солодовникова, послужили основой для формирования научной школы по теории регулирования, по разработке статистических методов управления, методов идентификации, теории систем с переменными параметрами и аналитических самонастраивающихся систем, спектральных методов, принципа сложности, основ теории оптимального управления многообъектными многокритериальными и многоуровневыми системами развития научных основ комплексной автоматизации и автоматизированных систем управления технологическими процессами.

Достижения научно-педагогической деятельности В. В. Солодовникова и его школы находят применение в оборонной промышленности, на предприятиях космической отрасли и при подготовке специалистов на кафедре в процессе становления и развития учебных специализаций по системам управления ракет, системам управления космических летательных аппаратов на базе кафедры и филиалов на предприятиях.

## SUMMARY

P. 7—11.

### MICROGEOMETRY AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF MACHINE PARTS SURFACES

Non-parametric approach is shown to be appropriate for problems of optimization of machine part surface characteristics depending on the surface functional properties.

**Keywords:** microgeometry of machine part surface, characteristics of machine part surface, optimization of surface layer properties, measurement, control.

#### *Data on authors*

- Vyacheslav A. Valetov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: valetov@tps.ifmo.ru
- Andrey Yu. Ivanov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: auivanov@mail.ifmo.ru

P. 12—14.

### ON OPTIMIZATION PROBLEMS FOR MICROGEOMETRY OF MACHINE PART SURFACE LAYER

The problem of machine part surface underfeature optimization for a given functional characteristic is considered. The challenge related to insufficient information provided by standard parametric criteria for surface microrelief estimation is analyzed.

**Keywords:** functional characteristic, nonparametric estimation criteria, optimization of microrelief.

#### *Data on authors*

- Sergey D. Tretyakov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: tretiserge@mail.ru
- Olga S. Yulmetova* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; Assistant Lecturer;  
E-mail: www.ralli@rambler.ru

**P. 15—19.****CREATION OF DATABASE OF NONPARAMETRIC CRITERIA FOR ESTIMATION OF FUNCTIONAL SURFACE MICROGEOMETRY**

The necessity of creation of database of nonparametric criteria for estimation of functional surface microgeometry is justified. Stages of the database design and selection of instrumental means to be used are considered. Structure and logical scheme of the database are described.

**Keywords:** functional characteristic, nonparametric estimation criteria, database design, database control system.

*Data on authors*

- Olga S. Yulmetova** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; Assistant Lecturer;  
E-mail: [www.ralli@rambler.ru](mailto:www.ralli@rambler.ru)
- Artem N. Sisyukov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: [i@an.spb.ru](mailto:i@an.spb.ru)
- Rina R. Yulmetova** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: [rina-yulmetova@yandex.ru](mailto:rina-yulmetova@yandex.ru)

**P. 19—22.****PROVISION OF QUALITY CHARACTERISTICS OF FRICTION COUPLE UNDER SPECIAL OPERATING CONDITIONS**

Effect of regular microrelief of friction surfaces with solid film coating on adhesion of the coating to the surface, friction coefficient, and endurance of friction couples at high temperature in vacuum is investigated. The coating on the base of molykote are analyzed. Vibratory burnishing of the surfaces to produce regular microrelief is shown to increase adhesion of the coating to the surface several times and allows for control over the coating quality.

**Keywords:** frequency couple, regular microrelief, friction coefficient, solid film coating, adhesion, vacuum, temperature.

*Data on authors*

- Viktor M. Medunetsky** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology
- Igor R. Tsimbal** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; Leading Mechanical Engineer

**P. 23—26.****DIMENSIONAL STABILITY OF MATERIALS AND CONSTRUCTIONAL ELEMENTS IN INSTRUMENT MAKING**

Causes of dimensional instability of instrument components and materials are considered, physical mechanisms of the instability manifestation are described. A combined computational and experimental method is proposed for evaluation of dimensional instability of assembly units. Urgency of the method application to precision instrument design is noted.

**Keywords:** geometrical instability, resistance to plastic microdeformations, microcreep.

*Data on authors*

- Svetlana A. Yakovleva** — Cental Research Institute Elektropribor Public Corporation, St. Petersburg; Engineer;  
E-mail: [yorkunoi@gmail.com](mailto:yorkunoi@gmail.com)
- Olga S. Yulmetova** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; Assistant Lecturer;  
E-mail: [www.ralli@rambler.ru](mailto:www.ralli@rambler.ru)

**P. 26—29.****MODELING OF VIBRATORY BURNISHING**

Application of computer modeling method to the process of vibratory burnishing to produce regular microrelief of the surface is considered. Computer program ACOPMP designed for calculation of vibratory burnishing parameters and graphic representation of the instrument motion path is presented.

**Keywords:** vibratory burnishing, modeling.

*Data on authors*

- Maxim A. Golubchikov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology
- Yury P. Kuzmin** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology

**P. 30—33.****INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESS BY THE ELECTROCONTACT METHOD**

Relation between mechanical and electric characteristics is investigated with the aim of measuring of residual stress in metals after machining of various types. Experiments are carried out with the use of the electrocontact method as well as by nondestructive etching. The possibility is shown to determine residual stress in metal samples after machining from specific electrical resistance.

**Keywords:** residual stress, machining, surface layer quality, nondestructive control.

*Data on authors*

- Sergey D. Vasilkov** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; Senior Lecturer;  
E-mail: vasilkovsd@mail.ru
- Sergey A. Talnishnikh** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: miculi@mail.ru

**P. 34—39.****INTEGRATED SYSTEM OF AUTOMATED ASSEMBLY OF MICROLENSES**

The process of automated assembly of microlenses based on preliminary modeling of the process is considered. Design concept is presented of automated assembly system, the assembly technology and the system composition and structure are described. Program means to be used in assembly control and virtual assembly design are outlined.

**Keywords:** technological assembly system, microlens, assembly automation, virtual assembly.

*Data on authors*

- Boris S. Padun** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: bsp.tps.ifmo@mail.ru
- Svyatoslav M. Latyev** — Dr. Tech. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: latyev@qrv.ifmo.ru

P. 39—46.

### OPTIMIZATION OF MICROLENS ASSEMBLY PROCESSES

Conceptual and stochastic models of assembly line are analyzed. Approaches to the problem of optimization of technological assembly process are considered.

**Keywords:** technological assembly line, workflow, microlens, product flow, virtual assembly, modeling.

#### *Data on authors*

- Taufik I. Aliev** — Dr. Tech. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Technology; E-mail: aliev@d1.ifmo.ru
- Boris S. Padun** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: bsp.tps.ifmo@mail.ru

P. 47—50.

### PROBLEMS OF MEANS CREATION FOR THE OCEAN SHELF DEVELOPMENT

Feasibility is discussed of employment of unmanned small robot submarine apparatus in development of mineral deposits at continental shelf bordering on Russia. Urgency of development of such apparatus is substantiated, necessity of tool set design to ensure complex testing of the apparatus during the manufacturing process.

**Keywords:** submarine technologies, unmanned robot submarine apparatus, starting device, hydrodynamic test bench.

#### *Data on author*

- Anton V. Krasilnikov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

P. 50—55.

### TOOL SET FOR FINE-TUNING OF SUBMARINE APPARATUS STARTING DEVICE

A principle solution is proposed to construction of hydrodynamic test bench designed for fine-tuning of starting devices of unmanned robot submarine apparatus during the manufacturing process. Method of calculation of required technical characteristics of the hydrodynamic test bench is presented.

**Keywords:** autonomous unmanned submarine apparatus, starting device, testing, hydrodynamic test bench, technical characteristics, project feasibility.

#### *Data on authors*

- Vyacheslav A. Valetov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: valetov@tps.ifmo.ru
- Anton V. Krasilnikov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

**P. 56—59.****COMPUTER-AIDED DESIGN OF GROUP MACHINE APPLIANCES**

Several lines are discussed of development of computer-aided design of production tools including group machine appliances. An example is presented of machine power clamping device design with the use of SolidWorks application. A method of group machine appliances design in SolidWorks is described.

**Keywords:** computer-aided design, group machine appliance, SolidWorks.

**Data on author**

**Eugeny A. Serkov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: ifmo\_serkov@mail.ru

**P. 60—64.****APPLICATION OF OPTICAL SCANNING TECHNOLOGY TO NEW MANUFACTURE PRODUCE PREPRODUCTION**

The problems are considered of manufacture produce models design on the base of a complex-geometry prototype and accuracy analysis of the models. Possibility is discussed of the use of 3D scanning data for the models development.

**Keywords:** 3D scanning, solid-state modeling, polygonal model.

**Data on authors**

**Andrey A. Gribovsky** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: griandrey@yandex.ru

**Alexander V. Pirogov** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: avpir@mail.ru

**Ekaterina E. Aleshina** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: aleshina.ekaterina@gmail.com

**P. 64—67.****ORGANIZATION OF EDUCATIONAL PROCESS IN SURFACE MOUNTING LABORATORY**

Basic principles are considered of students training at surface mounting laboratory. Examples are presented of approaches to education model with the use of installation equipment.

**Keywords:** educational process, printed circuit card manufacturing, workflow.

**Data on authors**

**Yury V. Fedosov** — Marine Navigation Systems Close Corporation, St. Petersburg; Engineer;  
E-mail: yf01@yandex.ru

**Sergey F. Sobolev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology;  
E-mail: tps-ssf@rambler.ru

---

**P. 67—73.**

**ADAPTIVE COMPUTER-AIDED PRODUCTION SCHEDULING**

Dynamic demand during control system operation is shown to necessitate a change-over to adaptive scheduling. A method is proposed for description of adaptive scheduling process allowing for analysis of the process dynamics and evaluation of reasonability of switching to new production. Theoretical propositions are confirmed by presented results of applied computer realization.

**Keywords:** adaptive scheduling, manufacturing, method.

***Data on author***

***Vladimir D. Chertovskoy*** — Professor; St. Petersburg State University of Technology and Design, Department of Information and Control Systems