

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Пензенский государственный технологический университет»**

---



ISSN 2221-951X

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# **XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего** *плюс*

Периодическое научное издание

Серия: технические науки.

Машиностроение и информационные технологии

**12(16)/2013**

Пенза  
ПензГТУ  
2013

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего<sub>плюс</sub> :  
Периодическое научное издание. – Пенза : Изд-во Пенз. гос.  
технол. ун-та, 2013. – № 12(16). – 285 с.

Решением Президиума ВАК при Минобрнауки России  
№ 8 /13 от 2 марта 2012 г. журнал включен в Перечень рецен-  
зируемых научных журналов и изданий для опубликования  
основных научных результатов диссертаций.



Ministry of Education and Science of the Russian Federation  
Penza State Technological University

ISSN 2221-951X

**SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL JOURNAL**

**XXI century: Resumes of the Past  
and Challenges of the Present<sub>plus</sub>**

**Scientific Periodical**

**Series: Engineering Sciences.  
Mechanical Engineering and Information Technologies**

**12(16)/2013**

Penza  
PenzSTU  
2013

---

## SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL JOURNAL

XXI century: resumes of the past and challenges of the present<sub>plus</sub> : Scientific periodical. – Penza : PenzSTU Publishing House, 2013. – № 12(16). – 285 c.

The journal is included in the List of reviewed scientific journals and editions for publishing principal scientific theses results approved by the Resolution of the Presidium of the Supreme Certification Commission of the Ministry of Education and Science of Russia (№ 8/13, March 2nd, 2012).





## Содержание

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИКИ

#### **ВЛИЯНИЕ СЕМАНТИКИ УСЛОВНЫХ ШКАЛ НА ТОЧНОСТЬ ДЕФАЗЗИФИКАЦИИ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ЕЁ КЛАСТЕРИЗАЦИЮ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ АНОМАЛИЙ .....13**

© **В.В. Рыжак**ов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **М.В. Рыжак**ов, Московский физико-технический институт (государственный университет) (г. Долгопрудный, Россия)

#### **ВЛИЯНИЕ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБЪЕМНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНО-ПЛАНЕТАРНОЙ ОБРАБОТКИ.....20**

© **В.З. Зверовиц**иков, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)

© **И.И. Вояч**ек, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)

© **А.Е. Зверовиц**иков, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)

© **А.В. Понука**лин, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)

#### **ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА .....26**

© **Л.А. Найни**ш, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (г. Пенза, Россия)

© **Л.В. Ремон**това, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **С.А. Кочер**ова, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### **КОМПЬЮТЕРНЫЙ ИМИТАТОР СЧЁТЧИКА ЖИДКОСТИ**

#### **«ЦЕНТРОСОНИК-М».....32**

© **И.А. Прош**ин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **Е.С. Прош**ина, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **А.В. Василь**ков, ОАО «Научно-производственное предприятие «Рубин»  
(г. Пенза, Россия)

© **В.В. Волк**ов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### **ТРЕНАЖЕРЫ МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ**

#### **ОПЕРАТОРОВ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ.....37**

© **И.А. Гарь**кина, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (г. Пенза, Россия)

© **А.М. Дани**лов, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (г. Пенза, Россия)

© **И.А. Прош**ин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### **КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ**

#### **РАЗВЕРТОК .....42**

© **В.В. Була**вин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **В.Б. Моис**еев, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**ГЕОМЕТРИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТАЗОВ ПРИ  
КОНСТРУИРОВАНИИ МАШИНЫ ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОГО  
ДВУХКОНДЕНСЕРНОГО (ФРИКЦИОННОГО) СПОСОБА  
ФОРМИРОВАНИЯ ПРЯЖИ.....47**

- © **И.И. Привалов**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **Е.Ю. Юдина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **А.В. Иванов**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **Р.Ф. Сатаева**, Кузнецкий технологический институт  
(г. Кузнецк, Пензенская обл., Россия)

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ**

**ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ КАК ОСНОВНАЯ ПРОЦЕДУРА  
В ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ  
КОМПЬЮТЕРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....52**

- © **Д.И. Прошин**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
КАЛИБРОВОЧНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ВИБРОСТЕНДА.....58**

- © **А.А. Абакумов**, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)  
© **Т.В. Астахова**, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)  
© **А.Д. Семёнов**, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО  
КОМПЛЕКСА СЕТЕВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
ЛАБОРАТОРИЙ.....62**

- © **Р.Д. Прошина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **Е.С. Прошина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **В.В. Волков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ  
МАЛОГАБАРИТНОГО ОСТОВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ .....68**

- © **В.В. Волков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **В.С. Николаев**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **С.В. Волков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**КОМПЛЕКС ПРОГРАММ КОМПЬЮТЕРНО-ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ .....72**

- © **Д.И. Прошин**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **Р.Д. Прошина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)  
© **Е.А. Данишкина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

|                                                                                                                                                        |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ В ЗАДАЧЕ УСТОЙЧИВОСТИ<br/>ТОНКОСТЕННОГО ПРОФИЛЯ СОСУДОВ ПИЩЕВЫХ<br/>ПРОИЗВОДСТВ .....</b>                                  | <b>77</b>  |
| © <b>В.А. Авроров</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| © <b>В.С. Николаев</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                  |            |
| © <b>В.В. Бурков</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                    |            |
| <b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ<br/>АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕГРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА<br/>СЕТЕВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛАБОРАТОРИЙ .....</b> | <b>82</b>  |
| © <b>И.А. Прошин</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                    |            |
| © <b>Н.Н. Прошина</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| © <b>Е.А. Данишкина</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                 |            |
| © <b>Н.Н. Короткова</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                 |            |
| <b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО<br/>ИНФОРМАЦИОННЫМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ.....</b>                                                       | <b>88</b>  |
| © <b>В.С. Николаев</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                  |            |
| © <b>В.А. Авроров</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| © <b>В.В. Волков</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                    |            |
| © <b>А.М. Бочков</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                    |            |
| <b>ИНТЕГРИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНО-<br/>ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ<br/>ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....</b>                                       | <b>95</b>  |
| © <b>Р.Д. Прошина</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| © <b>Е.С. Прошина</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| © <b>Е.Н. Салмов</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                    |            |
| <b>АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА<br/>ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРНИКА<br/>И ПРЕГРАДЫ .....</b>                               | <b>102</b> |
| © <b>М.В. Колодяжный</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                |            |
| © <b>Ю.Н. Косенок</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| <b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ<br/>ПРОЦЕССОВ В ИНТЕГРИРОВАННОМ КОМПЛЕКСЕ СЕТЕВЫХ<br/>АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛАБОРАТОРИЙ.....</b>        | <b>105</b> |
| © <b>Д.И. Прошин</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                    |            |
| © <b>Е.А. Данишкина</b> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                                 |            |

|                                                                                                                                                       |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| © <i>Н.Н. Короткова, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                 |            |
| <b>КОМПЛЕКС ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ .....</b>                                                   | <b>114</b> |
| © <i>Д.А. Тарасов, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| <b>КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ .....</b>                                                                           | <b>120</b> |
| © <i>И.И. Привалов, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                  |            |
| <b>АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ<br/>ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ</b>                                                                                           |            |
| <b>ИЗМЕРИТЕЛЬ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ЖИДКОСТИ.....</b>                                                                                                     | <b>125</b> |
| © <i>П.И. Артамонов, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                 |            |
| © <i>Б.Л. Свистунов, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                 |            |
| © <i>Б.А. Ахметов, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева</i> (г. Алматы, Республика Казахстан)                             |            |
| <b>МНОГОКОНТУРНАЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНОЙ МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ .....</b> | <b>132</b> |
| © <i>П.Ю. Волков, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                    |            |
| <b>ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОТБОРА ВОЛОКНА ИЗ КИП ХЛОПКА .....</b>                                                                                        | <b>138</b> |
| © <i>В.В. Волков, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                    |            |
| © <i>А.Д. Семёнов, Пензенский государственный университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                                   |            |
| © <i>Р.Ф. Сатаева, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| <b>КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТИПА СОПЛО – ЗАСЛОНКА .....</b>                                      | <b>142</b> |
| © <i>Н.А. Симанин, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| © <i>И.А. Поляков, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                   |            |
| <b>БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ, РЕКУРРЕНТНЫЙ, ШАГОВЫЙ АЛГОРИТМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОДАЧИ ВОЗДУХА В ТОПКУ .....</b>                                       | <b>147</b> |
| © <i>И.И. Коновалова, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                |            |
| © <i>А.Д. Семёнов, Пензенский государственный университет</i> (г. Пенза, Россия)                                                                      |            |
| © <i>Н.К. Пакулова, Пензенский государственный технологический университет</i><br>(г. Пенза, Россия)                                                  |            |
| <b>РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРОСВЕТА БУМАЖНОГО ПОЛОТНА .....</b>                                             | <b>150</b> |
| © <i>А.Д. Семёнов, Пензенский государственный университет</i> (г. Пенза, Россия)                                                                      |            |

|                                                                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| © <i>С.В. Никулин</i> , Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)                                    |            |
| © <i>А.Н. Расстегаев</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                 |            |
| <b>К ВОПРОСУ ОБ ИНВАРИАНТНОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ ТОКАРНОГО ТИПА .....</b>                                | <b>155</b> |
| © <i>Ю.М. Передрей</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                   |            |
| © <i>А.Д. Нелюдов</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                    |            |
| <b>РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСИЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.....</b>                             | <b>160</b> |
| © <i>Н.А. Симанин</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                    |            |
| © <i>И.А. Поляков</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                    |            |
| <b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ .....</b>                                                           | <b>165</b> |
| © <i>Ю.М. Передрей</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                   |            |
| © <i>А.Д. Нелюдов</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                    |            |
| <br><b>АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СБОРКА<br/>В МАШИНОСТРОЕНИИ</b>                                                            |            |
| <b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СБОРОЧНОГО ПРОЦЕССА .....</b>                                                 | <b>169</b> |
| © <i>В.В. Голубовский</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                |            |
| © <i>С.Г. Прохоров</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                   |            |
| <b>ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ .....</b>                                                                      | <b>173</b> |
| © <i>А.В. Ланичиков</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                  |            |
| © <i>К.В. Воробьёв</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                   |            |
| <b>К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАТЯЖКИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ ПОРШНЕВЫМИ ГАЙКОВЕРТАМИ .....</b>    | <b>179</b> |
| © <i>Е.А. Колганов</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                   |            |
| © <i>А.А. Селиверстов</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                |            |
| © <i>М.В. Черкунов</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                   |            |
| <b>ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ С ИЗМЕНЕННОЙ РЕЕЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ.....</b>                                                       | <b>183</b> |
| © <i>А.В. Ланичиков</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                  |            |
| © <i>С.И. Пижонков</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                   |            |
| <b>ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ .....</b> | <b>187</b> |
| © <i>В.В. Голубовский</i> , Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)                |            |

|                                                                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| © <i>С.Г. Прохоров</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                       |            |
| <b>ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ С КРИВОШИПОМ .....</b>                                                                                               | <b>192</b> |
| © <i>А.В. Ланицков</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                       |            |
| © <i>А.А. Якомазов</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                       |            |
| <b>ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ, ПРОЧНОСТИ<br/>И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, УЗЛОВ<br/>И МЕХАНИЗМОВ</b>                                            |            |
| <b>ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС<br/>РЕДУКТОРОВ ПРЯДИЛЬНЫХ МАШИН .....</b>                                                       | <b>196</b> |
| © <i>А.В. Сергеичев</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                      |            |
| © <i>А.С. Липин</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                          |            |
| <b>ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В СИЛОВОМ<br/>БЛОКЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РЕЗЬБОВЫХ<br/>СОЕДИНЕНИЙ .....</b>                       | <b>199</b> |
| © <i>М.В. Черкунов</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                       |            |
| <b>ПРИРАБОТКА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ МАШИН ПО ВЕЛИЧИНЕ<br/>ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ И ИЗНАШИВАНИЯ .....</b>                                           | <b>204</b> |
| © <i>А.В. Сергеичев</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                      |            |
| © <i>А.С. Липин</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                          |            |
| <b>МОДЕЛИ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ<br/>ИЗДЕЛИЙ МЕХАТРОНИКИ .....</b>                                                           | <b>209</b> |
| © <i>В.Ю. Зайцев</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                         |            |
| <b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ</b>                                                                                                                     |            |
| <b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАГРЕВА<br/>НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА<br/>МДО-ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ .....</b>        | <b>215</b> |
| © <i>О.Е. Чуфистов</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                       |            |
| © <i>Е.А. Чуфистов</i> , Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)                                                          |            |
| <b>ОПЫТ РАЗРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ С ПОЗИЦИЙ СИСТЕМНОГО<br/>АНАЛИЗА .....</b>                                                                    | <b>219</b> |
| © <i>И.А. Гарькина</i> , Пензенский государственный университет архитектуры<br>и строительства (г. Пенза, Россия)                           |            |
| © <i>А.М. Данилов</i> , Пензенский государственный университет архитектуры<br>и строительства (г. Пенза, Россия)                            |            |
| © <i>И.А. Прошин</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                         |            |
| <b>ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПРЕИМУЩЕСТВЕННО<br/>СОСТОЯЩИХ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, НА ДЕТАЛЯХ<br/>ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ .....</b> | <b>225</b> |
| © <i>О.Е. Чуфистов</i> , Пензенский государственный технологический университет<br>(г. Пенза, Россия)                                       |            |

© **Е.А. Чуфистов**, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)

© **В.П. Артемьев**, Кубанский государственный технологический университет  
(г. Краснодар, Россия)

**ТЕХНОЛОГИЯ УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ  
МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА .....231**

© **А.Н. Расстегаев**, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)

© **В.В. Голубовский**, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)

**АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ШНЕКОВОГО РАСТВОРИТЕЛЯ  
В ПРОЦЕССЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СИЛЬВИНИТА .....234**

© **А.С. Паличева**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **К.Р. Таранцева**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**ОБРАБОТКА НЕЧЕТКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАПРОСОВ  
К КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ БАЗЕ ДАННЫХ .....240**

© **М.Ю. Бабич**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **В.Е. Кузнецов**, ОАО «Научно-производственное предприятие “Рубин”»  
(г. Пенза, Россия)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЧЕТКОГО РАССТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ  
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О НЕЧЕТКИХ  
КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ.....244**

© **М.Ю. Бабич**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **Н.П. Бажутина**, ООО «Прогрестех» (г. Москва, Россия)

**ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ С ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНЫМ  
МОДУЛИРОВАННЫМ СИГНАЛОМ.....247**

© **М.М. Бутаев**, ОАО «Научно-производственное предприятие “Рубин”»  
(г. Пенза, Россия)

© **Е.А. Данилов**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **И.И. Сальников**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНОГО  
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА  
ОХРАНЫ.....251**

© **М.М. Бутаев**, ОАО «Научно-производственное предприятие “Рубин”»  
(г. Пенза, Россия)

© **И.И. Сальников**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ  
НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....255**

© **А.А. Папко**, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений"  
(ОАО "НИИФИ") (г. Пенза, Россия)

© **И.Ю. Сёмочкина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **А.М. Михеев**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

|                                                                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ<br/>МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ<br/>ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ<br/>ПАРАЗИТНЫХ МДП-СТРУКТУР .....</b> | <b>259</b> |
| © <i>А.Г. Дмитриенко, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений" ("НИИФИ") (г. Пенза, Россия)</i>                                          |            |
| © <i>А.А. Папко, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений" ("НИИФИ") (г. Пенза, Россия)</i>                                               |            |
| <b>МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МНОГОФАКТОРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ<br/>МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО<br/>МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО<br/>НАЗНАЧЕНИЯ .....</b>      | <b>264</b> |
| © <i>А.Н. Бормотов, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)</i>                                                            |            |
| © <i>И.А. Прошин, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)</i>                                                              |            |
| <b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ<br/>КОМПОЗИТОВ В ВИДЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ<br/>ПО КРАЕВЫМ ТОЧКАМ ОБЛАСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ .....</b>                    | <b>272</b> |
| © <i>А.Н. Бормотов, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)</i>                                                            |            |
| © <i>И.А. Прошин, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)</i>                                                              |            |
| © <i>С.В. Тюрденева, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)</i>                                                           |            |
| <b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ .....</b>                                                                                                                             | <b>281</b> |



## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИКИ

---

УДК 510.22; 519.21.248

### ВЛИЯНИЕ СЕМАНТИКИ УСЛОВНЫХ ШКАЛ НА ТОЧНОСТЬ ДЕФАЗЗИФИКАЦИИ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ И ЕЁ КЛАСТЕРИЗАЦИЮ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ АНОМАЛИЙ

© **В.В. Рыжяков**, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)

© **М.В. Рыжяков**, Московский физико-технический институт  
(государственный университет) (г. Долгопрудный, Россия)

### THE INFLUENCE OF SEMANTICS CONDITIONAL ON THE ACCURACY OF THE SCALES OF DEFUZZIFICATION OF FUZZY INFORMATION AND ITS CLUSTERING IN TERMS OF MAN-MADE AND NATURAL ANOMALIES

© **V.V. Ryzhakov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **M.V. Ryzhakov**, Moscow Institute of Physics and Technology (State University)  
(Recently the Moscow region, Russia)

Предложен алгоритм, позволяющий повысить точность дефаззификации нечеткой информации, в котором учитываются вероятности смены условных шкал, соответствующих различным аномалиям. Результаты указанной дефаззификации позволяют более адекватно обстоятельствам выполнить кластеризацию нечетких ситуаций и с учетом этого принять более правильное решение по предотвращению негативных последствий аномалий.

**Ключевые слова:** семантика, условные шкалы, нечеткая информация, точность, дефаззификация, кластеризация.

The algorithm, which allows to improve the accuracy of defuzzification of fuzzy information, which takes into account the change of conditional probability scales corresponding to various anomalies. The results of this defuzzification allow more appropriate circumstances to perform fuzzy clustering situations and with this in mind, take a right decision to prevent the negative consequences of anomalies.

**Key words:** semantics, conditional scale, fuzzy information, accuracy, defuzzification, clustering.

**E-mail:** rvv@pgta.ru; mryzhakov@applmech.mipt.ru

#### Часть 1. Дефаззификация

В связи с тем, что семантика условных шкал, используемых для измерения нечеткой информации, может быть подвержена значительному влиянию различных аномалий, определяющих условия получения указанной информации, то возникающие вариации семантики необходимо оценивать и учитывать. Далее представим аналитический аппарат, который можно использовать как основу методологии решения поставленной задачи.

Ранее авторы предложили элементы аналитического представления отмеченных аномалий на динамику семантики условных шкал, которая в указанных условиях оказывает влияние на точность (на погрешность) нечеткой информации [1]. В этой работе динамика семантики представлена матрицами функций принадлежности, отображений и их произведений. В совокупности они представляют состояние исследуемой системы (объекта, природной или техногенной среды).

Чтобы обобщить все состояния системы в компактной форме, авторы предлагают воспользоваться теоретическими положениями цепей Маркова с

дискретным временем [2, 3], взяв за ключевой элемент исследования наблюдаемой системы функцию отображения, которая подвергается изменениям с определенной вероятностью с целью адаптации условных шкал к изменившимся условиям (обстоятельствам) техносферы или природной среды. Одно из общих направлений приближенного решения этой задачи авторы наметили в [1] с использованием принципа кластеризации. Его отдельные элементы на основе нечетких ситуаций изложены в [4]. Этот принцип позволяет осуществить формализацию и классификацию состояний исследуемого объекта в виде кластеров нечетких ситуаций, но оставлены в тени учет указанных выше вероятностей состояний и вероятностей их взаимных переходов.

Рассмотрим две группы условных шкал, включающих по три терма, что не снижает общности результатов исследований: шкала а) будет соответствовать шкалам с равномерным расположением типовых представителей термов на полном пространстве; шкала в) – со смещенными внутренними представителями термов в сторону верхней границы базового множества; шкала d) – со смещенными типовыми представителями термов в сторону нижней границы базового множества. Эта группа шкал может интерпретироваться природными аномалиями, вызванными, например, осадками в виде дождя и снега: шкала а) соответствует нормальному балансу осадков и их отсутствию; шкала в) – нарушению этого баланса в сторону засухи; шкала d) – нарушению в сторону переувлажнения почвы (наводнения).

Вторая группа условных шкал также содержит три условные шкалы, но с принципиально другим характером деформации (адаптации): шкала а) аналогична шкале а) первой группы; шкала в) соответствует расширению области существования средних термов и сужению областей существования крайних термов шкалы; шкала d) соответствует сужению области существования средних термов и расширению области существования крайних термов шкалы. Эту группу шкал можно интерпретировать температурой окружающей атмосферы при различной ветренности (высокая и низкая температуры опасны для объекта): а) соответствует небольшой ветренности; в) соответствует повышенной скорости ветра; d) – безветренной погоде. В этих случаях воздушные потоки понижают температуру объекта.

Таким образом, шкалы а), в), d) будут соответствовать определенным состояниям системы, которые будем характеризовать вероятностями  $P_a, P_v, P_d$ , а вероятности переходов из одного состояния в другое будем обозначать  $P_{av}, P_{ad}, P_{va}, P_{vd}, P_{da}, P_{dv}$ . Эти вероятности составят матрицу, которая объединяет все состояния и переходы.

Если перейти к обычной символике: строк  $i \in \{1, 2, 3\}$ , столбцов  $j \in \{1, 2, 3\}$ , что соответствует  $a \rightarrow 1; v \rightarrow 2; d \rightarrow 3$ , то матрица представится так:

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Элементарный анализ показывает, что для представленных групп шкал справедливо следующее положение: переход из состояния в) в состояние d) и наоборот из состояния d) в в) возможен только при переходе через состояние а). Из элементарного анализа следует ординарность событий

$$\begin{aligned} P_{vd} &= P_{23} = 0; \\ P_{dv} &= P_{32} = 0. \end{aligned} \quad (1a)$$

Если выполняется условие

$$\sum_j P_{ij} = 1, \quad (2)$$

то выполняется требование марковости матрицы (1) и её можно использовать для оценивания параметров системы и их диагностирования и прогнозирования. Это требование необходимо принимать во внимание при нахождении оценок элементов (1), учитывая при этом реальные условия эксплуатации и всю совокупность параметров исследуемых (диагностируемых) объектов.

Теперь с учетом (1) и (2) для того, чтобы повысить точность дефаззификации нечеткой информации, необходимо найти уточненные выражения «произведений» исходной универсальной матрицы функций принадлежности и матрицы, выражающей весь набор функций отображения [1]. Подходы к объединению вероятностей и показателей нечеткости (функций принадлежности) известны, например [5], но в рассматриваемых системах этот прием не совсем пригоден. Рассмотрим более подробно специфику предлагаемого нами метода.

В связи с тем, что каждая из указанных шкал с определенной вероятностью имеет право на применение, то для повышения точности указанной дефаззификации следует учитывать все шкалы с номером  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ . Это можно выразить в подробной записи алгоритмом дефаззификации вида

$$\bar{x}_{0t_l}^c = \sum_{i=1}^I P_i^c \bar{x}_{i,t_l}^c = \sum_{i=1}^I P_i^c \cdot \frac{\sum_{j_i} \mu_{j_i}^c x_{it_l}^c \cdot x_{j_i}^c}{\sum_{j_i} \mu_{j_i}^c x_{it_l}^c}, \quad (3)$$

где  $x_{it_l}^{(c)}$  – текущее значение  $c$ -го параметра на  $i$ -й шкале на момент  $t_l$  ;;

$\bar{x}_i^{(c)}$  – дефаззифицированное значение  $c$ -го параметра на  $i$ -й шкале;

$c \in \{1, 2, \dots, G\}$  ;

$\bar{x}_{t_l}^{(c)}$  – дефаззифицированное значение  $c$ -го параметра на момент  $t_l$  , определенное с учетом данных, взятых со всех шкал а), в), d);

$x_{j_i}^{(c)}$  – типовые представители термов (с номером  $j_i$ ) на  $i$ -й шкале параметра  $c$  ;

$j_i \in \{0, 1, \dots, J_i\}$  ;

$(1 + J_i)$  – число термов на  $i$ -й шкале;

$\mu_{j_i}^c x_{it_l}^c$  – функция принадлежности  $j$ -му терму на  $i$ -й шкале  $x_{it_l}^{(c)}$  – значения  $c$ -го параметра;

$P_i^{(c)}$  – вероятность  $i$ -го состояния системы (востребованности  $i$ -й шкалы  $c$ -го параметра или  $i$ -й функции отображения).

В качестве приближения (оценки)  $P_i$ , которую в общем случае следует нормировать, можно брать вероятность  $P_{ii}$  из (1), т.е. с учетом сказанного  $P_i^{(c)}$  будем оценивать, исходя из данных (1), путем нормирования всех  $P_{ii}$ .

С учетом того, что в процессе наблюдения (эксплуатации) объекта  $P_{ii}$  изменяются, это в итоге следует учитывать в алгоритме (3) путем оценивания степени  $\left(P^{(c)}\right)^y$  таким образом

$$\left(P^{(c)}\right)^{\gamma} = A^{(c)}(\lambda)^{\gamma} \left(A^{(c)}\right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – показатель степени-кратности контроля объекта;

$(\lambda)$  – матрица собственных чисел матрицы  $P^{(c)}$  - конкретизированная (1);

$A^{(c)}$  – матрица, столбцы которой составлены из координат собственных векторов  $P^{(c)}$ ;

$\left(A^{(c)}\right)^{-1}$  – матрица, обратная  $A^{(c)}$ .

После оценивания значений всех  $G$  параметров объекта их совокупности можно представить компактно в виде ситуации на момент  $t_l$

$$\tilde{S}_{t_l} = \left\{ \begin{array}{c} \bar{\mu}_{j_i}^1 \quad \bar{x}_{t_l}^1 \\ \hline \bar{x}_{t_l}^1 \end{array} \right\}, \dots, \left\{ \begin{array}{c} \bar{\mu}_{j_i}^c \quad \bar{x}_{t_l}^c \\ \hline \bar{x}_{t_l}^c \end{array} \right\}, \dots \quad (5)$$

где  $\bar{x}_{t_l}^{(c)}$  оценивается по (3) с учетом вероятностей шкал и данных типовых ситуаций.

В связи с тем, что для различных параметров набор шкал а), в), d) может быть различным, матрицы переходов типа (1) и оценки  $\bar{x}^{(c)}$  для них будут различными и потребуется определить матрицы:

$$P^{c^2} = P_{ij}^{c^2}; \quad P^{c^3} = P_{ij}^{c^3}; \quad P^{c^4} = P_{ij}^{c^4} \dots \quad (6)$$

для того, чтобы получить результаты дефаззификации с учетом их асимптотических свойств [6], соответствующих моментам  $2\bar{t}$ ,  $3\bar{t}$  и т.д. Вариации оценок элементов  $\left(P^{(c)}\right)^2, \left(P^{(c)}\right)^3 \dots$  приведут к различным оценкам значений параметров  $\bar{x}_{t_l}^{(c)}$  (3). Использование этих данных и осредненной  $Q$ -матрицы [3] позволит найти оценки  $P_{ij}^{(c)}$  в промежуточных точках  $t \in \{\bar{t}; 2\bar{t}\}, t \in 2\bar{t}; 3\bar{t} \dots$

С учетом исходных данных для всех трех шкал, например первой группы, имеющих по три терма, алгоритм (3) с учетом правил нормирования  $P_{ii}$  для первого параметра примет вид

$$\bar{x}_{t_l}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^{I=3} \frac{P_{ii}^{(1)}}{\sum_{i=1}^{I=3} P_{ii}^{(1)}} \cdot \frac{\sum_{j_i=0}^{j_i=2} \mu_{j_i}^{(1)}(x_{t_l}^{(1)}) \cdot x_{j_i}^{(1)}}{\sum_{j_i=0}^{j_i=2} \mu_{j_i}^{(1)}(x_{t_l}^{(1)})}}{\sum_{i=1}^{I=3} \frac{P_{ii}^{(1)}}{\sum_{i=1}^{I=3} P_{ii}^{(1)}}}, \quad (7)$$

где  $\bar{x}_{t_l}^{(1)}$  – осредненное значение первого параметра по всем шкалам;

$P_{ii}^{(1)} \in \{P_{11}^{(1)}, P_{22}^{(1)}, P_{33}^{(1)}\}$  – диагональные элементы матрицы (1);

$\mu_{j_i}^{(1)} \in \{\mu_{j_1}^{(1)}(x_{t_l}^{(1)}), \mu_{j_2}^{(1)}(x_{t_l}^{(1)}), \mu_{j_3}^{(1)}(x_{t_l}^{(1)})\}$  – функции принадлежности текущего значения первого параметра  $(x_{t_l}^{(1)})$  на первой, второй и третьей, соответственно, шкалах;

$\tilde{j}_i \in \{0; \tilde{j}_i = 1; \tilde{j}_i = 2\}$  – номера термов на  $i$ -х шкалах.

По другим параметрам процедуры дефаззификации аналогичны.

## Часть 2. Кластеризация

Далее изложим особенности кластеризации нечеткой информации с учетом рассмотренной выше динамики семантики шкал.

В качестве элементов нечеткой информации будем рассматривать нечеткие ситуации:  $\tilde{S}_{t_i}$  – текущую ситуацию на момент времени  $t_i$  и  $\tilde{S}_f^*$  – типовую ситуацию. Имея эти данные, можно оценить нечеткое отношение нечетких ситуаций  $R(\tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f)$  как степень включения (или равенства) текущей ситуации в ту или иную типовую ситуацию  $\tilde{S}_f^*$  [7]

$$R(\tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*) = \&v(\tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*) \quad (8)$$

или

$$R(\tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*) = \mu(\tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*) = v(\tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*) \&v(\tilde{S}_f^*, \tilde{S}_{t_i}), \quad (8a)$$

где  $v(\tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*)$  – нечеткое включение ситуаций;

$\mu(\tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*)$  – нечеткое равенство ситуаций.

При этом типовые представители типовых ситуаций оцениваются как средние по всем шкалам параметра ( $c$ ) и будут отнесены к осредненной шкале  $x_{j_0}^{(c)}$ , где 0 в индексе означает «осредненное значение» на «осредненной шкале».

Далее, для того, чтобы использовать в качестве основы кластеризации принцип, изложенный в [8, 9], следует оценивать наиболее близкий кластер типовых ситуаций текущим ситуациям.

При оценке следует учитывать данные дефаззификации (3), осредненные по всем шкалам  $\bar{x}_{0_{t_i}}^{(c)}$ , где  $c \in \{1, 2, \dots, G\}$ ;  $G$  – число измеряемых параметров объекта.

В связи с тем, что матрица переходов (1) с течением времени эксплуатации изменяется и, соответственно, результаты дефаззификации параметров ситуации, то также будут изменяться кластеры, включающие  $\tilde{S}_{t_i}$ , т.е. будут изменяться (8), (8a). Это приведет к тому, что оценки рисков опасности [8, 9] и спр также необходимо будет подвергнуть уточнениям.

Все изложенные рассуждения представим в аналитической форме.

Для этого рассмотрим типовые ситуации. Для каждого параметра  $c$  имеем  $N_{j(c)}$  типовых осредненных значений, соответствующих различным  $\bar{x}_{j_i}^{(c)}$ , которые в совокупности с данными других параметров образуют ситуации, каждая из которых может быть представлена в виде набора данных [8]

$$\tilde{S}_f^* = \bar{\mu}_{j_0}^c \bar{x}_{j_0}^c / \bar{x}_{j_0}^c, \quad (9)$$

где  $\bar{\mu}_{j_0}^c \bar{x}_{j_0}^c$  – осредненная функция принадлежности осредненного значения типового представителя  $\bar{x}_{j_0}^{(c)}$ ;

$$f \in \{1, 2, \dots, N^{(c)}\};$$

$$N^{(c)} = (J^{(1)} + 1)(J^{(2)} + 1) \dots (J^{(c)} + 1) \dots (J^{(G)} + 1);$$

$$j_i \in \{0; 1; \dots; J^{(c)}\} - \text{номер терма } \tilde{j}_i.$$

Текущую ситуацию на момент  $t_i$  на осредненных шкалах представим в краткой форме по аналогии с (9) так:

$$\tilde{S}_{t_i} = \left\{ \bar{\mu}_{j_0}^c (x_{t_i}^{(c)}) / x_{t_i}^{(c)} \right\}, \quad c \in \{1, 2, \dots, G\}, \quad (10)$$

где  $j_0$ , так же, как в (9), пробегает все значения  $\{0; 1; \dots; J_0^{(c)}\}$  по всем шкалам.

Теперь с учетом данных (9) и (10) оцениваются по (8) или (8а) с перебором всех  $\tilde{S}_f^*$  и текущей  $\tilde{S}_{t_i}$ . Из этих оценок выбирается  $\max \& \nu \tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*$  или  $\max \mu \tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^*$ , а типовые представители, соответствующие  $S_f^*(\bar{x}_{j_0}^{(c)})$ , используются при дефаззификации значений параметра  $c$  на осредненной шкале по формуле

$$x_{0t_i}^c = \frac{\sum_{j=0}^{J_i^c} \mu_{j_0}^c \cdot \bar{x}_{t_i}^c \cdot \bar{x}_{j_0}^c}{\sum_{j=0}^{J_i^c} \mu_{j_0}^c \cdot \bar{x}_{t_i}^c}, \quad (11)$$

которая представляет дефаззификацию осредненных значений параметров текущей ситуации.

Далее рассмотрим этапы конкретизации отношений (8), а на его основе нетрудно конкретизировать и (8а). Используя достаточно эффективный алгоритм Клини – Динса [10], можем записать

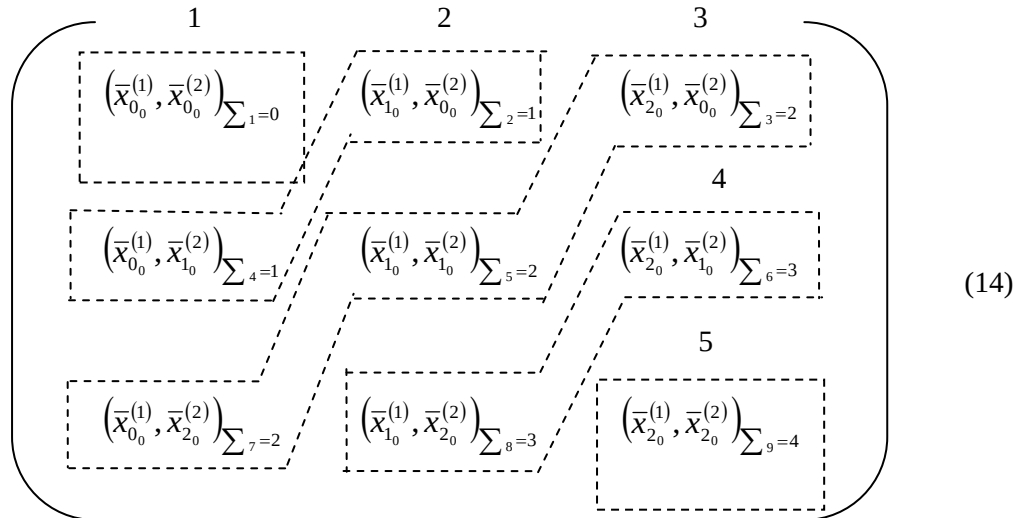
$$\nu \tilde{S}_{t_i}, \tilde{S}_f^* = \nu \mu_{\tilde{S}_{t_i}}, \mu_{\tilde{S}_{ji}^*} = \& \mu_{\tilde{S}_{t_i}} \rightarrow \mu_{\tilde{S}_{ji}^*} = \& \max 1 - \mu_{\tilde{S}_{t_i}}, \mu_{\tilde{S}_{ji}^*}. \quad (12)$$

В общем случае  $\nu \tilde{S}_f^*, \tilde{S}_{t_i}^* \neq \nu \tilde{S}_{t_i}^*, \tilde{S}_f^*$ , это учитывается в нечетком равенстве как

$$\mu \mu_{\tilde{S}_{t_i}}, \mu_{\tilde{S}_{ji}^*} = \nu \mu_{\tilde{S}_{t_i}}, \mu_{\tilde{S}_{ji}^*} \& \mu_{\tilde{S}_{ji}^*}, \mu_{\tilde{S}_{t_i}}. \quad (13)$$

Типовые ситуации можно синтезировать, используя принцип, изложенный в [8], по данным (типovým значениям термов) или по осредненной универсальной условной шкале. Типовые представители ее термов  $\bar{x}_{j_0}$  следует оценивать с учетом вероятностей востребованности шкал.

Таким образом, пусть объект характеризуется двумя параметрами, а каждый параметр – тремя термами. Индексы термов будем использовать для кластеризации. При этом типовую ситуацию будем представлять набором типовых значений термов по одному для каждого параметра. Всю совокупность типовых ситуаций представим в виде матрицы кластеров, пронумерованных 1, 2, 3, 4, 5:



При каждом элементе матрицы указана сумма номеров термов (лингвистических значений) параметров. Указанные индексы и используются для кластеризации ситуаций.

Используя данную методологию и исходные числовые данные по ситуациям, можно определить наиболее близкую к текущей ситуации типовую ситуацию, расположенную в фиксированном кластере. Это позволит оценить в экстренном порядке обстановку и принять решение по снижению риска аварий или других аномальных явлений, соответствующих плану определенного кластера (ситуации).

Из изложенного следует также, что повышение точности дефазификации нечеткой информации, а также с учетом этого и оценивание опасных кластеров, позволит более оперативно и правильно принимать решения по предупреждению или снижению опасных последствий техногенных или природных аномалий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Динамика семантики условных шкал оценивания нечеткой информации – отражение процессов природных и техногенных аномалий // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России : Межотраслевой научно-технический журнал. – М. : ВИМИ, 2013. – № 2. – С. 8–15.
2. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Разработка аналитических положений метода диагностирования и прогнозирования состояния системы блоков на основе цепей Маркова с дискретным временем // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России : Межотраслевой научно-технический журнал. – М. : ВИМИ, 2013. – № 3. – С. 24–28.
3. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Теория и алгоритмы диагностирования и прогнозирования состояния технических систем длительного применения на основе цепей Маркова : Монография. – М. : ВИНТИ РАН, депонирована 27.03.2013. № 88-В2013. – 55 с.
4. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Разработка и исследование метода кластеризации типовых нечетких ситуаций, характеризующих диагностируемый объект // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России : Межотраслевой научно-технический журнал. – М. : ВИМИ, 2011. – № 2. – С. 62–68.
5. Борисов В.В., Бояринов Ю.Г., Дли М.И., М-иценко В.И. Метод построения нечеткой полумарковской модели функционирования сложной системы // Программные продукты и системы : Международный журнал, 2010. – № 3. – С. 26–31.
6. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Исследование влияния устойчивости и асимптотичности цепей Маркова на диагностирование и прогнозирование состояния систем // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России : Межотраслевой научно-технический журнал. – М. : ВИМИ, 2013. – № 4. – С. 3–13.
7. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Прикладная метрология на основе представлений нечетких множеств. Основы прогнозирования в условиях чрезвычайных ситуаций. – М. : МФТИ, 2009. – 143 с.
8. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Аналитические положения диагностирования объектов на основе нечеткой информации с использованием искусственных нейронов. : Монография. – М. : МФТИ, 2010. – 111 с.
9. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Разработка и исследование метода кластеризации типовых нечетких ситуаций, характеризующих диагностируемый объект // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России : Межотраслевой научно-технический журнал. – М. : ВИМИ, 2011. – № 2. – С. 62–68.
10. Рыжаков В.В., Рыжаков М.В. Оптимизация выбора оператора импликации при диагностировании состояний объектов на основе нечеткой информации // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России : Межотраслевой научно-технический журнал. – М. : ВИМИ, 2012. – № 2. – С. 11–17.

**УДК 621.9.042**

**ВЛИЯНИЕ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ОБРАБАТЫВАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБЪЕМНОЙ ЦЕНТРОБЕЖНО-  
ПЛАНЕТАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

© *В.З. Зверовщиков, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)*

© *И.И. Воячек, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)*

© *А.Е. Зверовщиков, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)*

© *А.В. Понукалин, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)*

**THE EFFECT OF BULK DENSITY MANUFACTURING ENVIRONMENT  
ON THE PERFORMANCE OF VOLUMETRIC CENTRIFUGAL  
PLANETARY PROCESSING**

© *V.Z. Zverovschikov, Penza State University (Penza, Russia)*

© *I.I. Voyacheck, Penza State University (Penza, Russia)*

© *A.E. Zverovschikov, Penza State University (Penza, Russia)*

© *A.V. Ponukalin, Penza State University (Penza, Russia)*

В статье показано влияние насыпной плотности гранулированных абразивных рабочих тел на производительность объемной центробежно-планетарной обработки. Предложены новые абразивные гранулы на полимерной связке, которые позволяют эффективно обрабатывать детали с высокой насыпной плотностью.

**Ключевые слова:** объемная обработка, рабочее тело, насыпная плотность, момент инерции, масса гранулы.

The article shows the influence of the bulk density of granulated abrasive working bodies on the performance of bulk centrifugal planetary processing. Proposed new abrasive granules with polymer-bonded, which allow to effectively handle parts with a high bulk density.

**Key words:** volumetric processing, working body, bulk density, moment of inertia, mass of granules.

**E-mail:** torp@pnzgu.ru, hon3112@mail.ru

В различных отраслях промышленности широко применяют отделочно-зачистную обработку деталей для удаления заусенцев, размерной и декоративной отделки поверхностей, повышения качественных характеристик поверхностного слоя.

Одним из эффективных методов отделочно-зачистной обработки (ОЗО) является объемная центробежная обработка деталей в контейнерах с планетарным вращением [1]. Сущность метода заключается в том, что обрабатываемые детали и обрабатывающую среду, состоящую из гранулированных абразивных рабочих тел и технологической жидкости, загружают в цилиндрические контейнеры, которым сообщают планетарное вращение. Под действием инерционных сил, возникающих при вращении контейнеров, на поверхности уплотненной загрузки формируется скользящий слой, состоящий из обрабатываемых деталей и рабочих тел, а также образуется твердотельная зона, перемещающаяся синхронно со стенкой контейнера и зона относительного покоя вблизи центра масс уплотненной рабочей загрузки, совершающая при вращении контейнеров циркуляционное движение. При этом происходит проскальзывание обрабатываемых поверхностей деталей и гранулированных рабочих тел, обусловленное разностью их скоростей движения, что приводит к интенсивному съему металла абразивными гранулами.



Но эффективная область применения объемных методов ОЗО имеет технологические ограничения. Так, при обработке в контейнерах с планетарным вращением пустотелых или мелкогабаритных деталей с невысокой насыпной плотностью по сравнению с насыпной плотностью обрабатывающей абразивной среды проявляется так называемый эффект «всплытия», то есть происходит вытеснение подобных деталей на поверхность потока обрабатывающей среды, что приводит к существенному снижению интенсивности съема металла и качества поверхности. Условно назовем группу подобных деталей «легкими». Наоборот, при обработке «тяжелых» деталей, насыпная плотность которых значительно превышает насыпную плотность абразивной среды, происходит их быстрое погружение в массу абразивных гранул, что также приводит к снижению интенсивности обработки, так как наиболее эффективное удаление металла с обрабатываемых поверхностей происходит при движении деталей в слое рабочей загрузки.

Выполненные экспериментальные исследования показали, что для эффективной обработки поверхностей деталей необходимо поддерживать соотношение насыпной плотности деталей  $\rho_d$  к насыпной плотности абразивных рабочих тел  $\rho_{РТ}$  в следующем диапазоне:

$$\frac{\rho_d}{\rho_{РТ}} = 0,7...0,8. \quad (1)$$

Технологические меры для предотвращения эффекта «всплытия» легких деталей при центробежной обработке разработаны в работе [2], где автор предлагает для устойчивого погружения пустотелых деталей в скользящий слой рабочей загрузки устанавливать в полости обрабатываемых деталей технологические тела, масса  $m_T$  которых определяется из условия

$$m_T \geq \rho_{РТ} \cdot (V_M + V_{П}) - m_d, \quad (2)$$

где  $V_M$  – объем материала детали;

$V_{П}$  – объем внутренней полости детали;

$m_d$  – масса обрабатываемой детали.

На основании проведенных исследований предложен способ [5], обеспечивающий стабильную обработку различных пустотелых деталей путем увеличения их насыпной плотности.

Необходимое соотношение насыпной плотности обрабатываемых деталей и абразивных гранул при обработке можно обеспечить также изменением плотности абразивных гранул. Поэтому в тех случаях, когда замена материала связки абразивных гранул не представляется возможной по технологическим причинам, для изменения инерционных характеристик гранул (рабочих тел), предлагается имплантировать в гранулу инородное тело из материала с отличной плотностью [6], масса  $m_T$  которого определяется по выражению

$$m_T = \frac{V \cdot \rho_d - 0,75 \cdot M_{РТ} \cdot m_{РТ}}{0,75 \cdot M_{РТ}}, \quad (3)$$

где  $m_{РТ}$  – масса абразивной гранулы;

$V$  – необходимый для загрузки в контейнер объем абразивных гранул;

$M_{РТ}$  – масса абразивных гранул объемом  $V$ .

Следует учитывать, что насыпная плотность  $\rho_{РТ}$  абразивных рабочих тел зависит не только от массовых характеристик гранул, но также от их формы и размеров. В работе [3] для оценки технологической эффективности абразивных гранул различной формы предложены критерии проникающей способности  $K_{ПР}$  и стойкости формы при изнашивании  $K_{И}$ , которые позволяют анализировать

геометрическую форму существующих и разрабатывать новые формы рабочих тел для повышения эффективности ОЗО.

В работе [4] в качестве критерия сравнения обрабатывающей способности абразивных рабочих тел различной формы, при одинаковых массовых характеристиках гранул, использовали момент инерции  $I_{РТ}$  рабочего тела относительно его центра масс. При одинаковых скоростях контактного взаимодействия гранул с обрабатываемыми поверхностями, с увеличением момента инерции  $I_{РТ}$  рабочих тел, возрастает импульс движения, распределяющийся в зоне контакта с поверхностью детали, что интенсифицирует диспергирование металла.

Косвенно оценить обрабатывающую способность рабочих тел возможно по коэффициенту динамики  $K_d$ , который представляет собой отношение момента инерции рабочего тела  $I_{РТ}$  гранулы к его массе  $m_{РТ}$ :

$$K_d = \frac{I_{РТ}}{m_{РТ}}. \quad (4)$$

Увеличение соотношения (4) свидетельствует о большей удаленности ребер и вершин гранулы от центра масс, что приводит к увеличению импульса от вращательного движения абразивной гранулы, энергия которого трансформируется в энергию резания металла или деформирование поверхностного слоя в момент контакта с деталью.

Для сопоставления рабочих тел по их геометрическим и конструктивным параметрам предлагается использовать приведенный радиус  $R_{РТ}$  рабочего тела, равный радиусу шара с моментом инерции, соответствующим моменту инерции рабочего тела. А величину приведенного радиуса  $R_{РТ}$  рабочего тела предлагается определять по выражению

$$R_{РТ} = \sqrt{\frac{5 \cdot I_{РТ}}{2 \cdot m_{РТ}}}. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены динамические характеристики полимерных рабочих тел наиболее распространенных форм (фирмы «Rösler») и разработанных нами двояковыпуклых гранул [6].

Таблица 1 – Характеристики абразивных рабочих тел различной формы на полимерной связке

| Форма рабочего тела | Тип рабочего тела | Параметр               |                 |                                  | Момент инерции тела $I_{РТ}$ , г×см <sup>2</sup> | Приведенный радиус тела $R_{РТ}$ , см | Объем тела $V_{РТ}$ , см <sup>3</sup> | Масса тела $m_{РТ}$ , г | Коэффициент динамики рабочего тела $K_d$ |
|---------------------|-------------------|------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
|                     |                   | Длина стороны $a$ , см | Высота $h$ , см | Радиус осевого вращения $R$ , см |                                                  |                                       |                                       |                         |                                          |
| Цилиндр             | RM 02/05 Z        | -                      | 0,5             | 0,1                              | 0,00                                             | 0,14                                  | 0,02                                  | 0,04                    | 0,01                                     |
|                     | RM 04/10 Z        | -                      | 1               | 0,2                              | 0,01                                             | 0,27                                  | 0,13                                  | 0,31                    | 0,02                                     |
|                     | RM 05/08 Z        | -                      | 0,8             | 0,25                             | 0,01                                             | 0,31                                  | 0,16                                  | 0,39                    | 0,03                                     |
|                     | RM 06/10 Z        | -                      | 1               | 0,3                              | 0,03                                             | 0,38                                  | 0,28                                  | 0,70                    | 0,05                                     |
|                     | RM 08/20 Z        | -                      | 2               | 0,4                              | 0,20                                             | 0,54                                  | 1,01                                  | 2,50                    | 0,08                                     |
|                     | RM 9/13 Z         | -                      | 1,3             | 0,45                             | 0,21                                             | 0,55                                  | 0,83                                  | 2,06                    | 0,10                                     |
|                     | RM 10/16 Z        | -                      | 1,6             | 0,5                              | 0,39                                             | 0,62                                  | 1,26                                  | 3,13                    | 0,13                                     |
| Конус               | RM 12/16 Z        | -                      | 1,6             | 0,6                              | 0,81                                             | 0,72                                  | 1,81                                  | 4,51                    | 0,18                                     |
|                     | RM 15 K           | -                      | 1,5             | 0,75                             | 0,37                                             | 0,62                                  | 0,88                                  | 2,20                    | 0,17                                     |
|                     | RM 19 K           | -                      | 1,9             | 0,95                             | 1,21                                             | 0,78                                  | 1,80                                  | 4,47                    | 0,27                                     |
|                     | RM 20 K           | -                      | 2               | 1                                | 1,56                                             | 0,82                                  | 2,09                                  | 5,22                    | 0,30                                     |
|                     | RM 30 K           | -                      | 3               | 1,5                              | 11,88                                            | 1,23                                  | 7,07                                  | 17,60                   | 0,68                                     |
|                     | RM 35 K           | -                      | 3,5             | 1,75                             | 25,68                                            | 1,44                                  | 11,22                                 | 27,95                   | 0,92                                     |
|                     | RM 40 K           | -                      | 4               | 2                                | 50,06                                            | 1,64                                  | 16,76                                 | 41,72                   | 1,20                                     |
|                     | RM 45 K           | -                      | 4,5             | 2,25                             | 90,22                                            | 1,85                                  | 23,86                                 | 59,40                   | 1,52                                     |
|                     | RM 60 K           | -                      | 6               | 3                                | 380,18                                           | 2,47                                  | 56,55                                 | 140,81                  | 2,70                                     |

Окончание табл. 1

| Форма рабочего тела    | Тип рабочего тела | Параметр               |                 |                           | Момент инерции тела $I_{RT}$ , $г \times см^2$ | Приведенный радиус тела $R_{пр}$ , см | Объем тела $V_{RT}$ , $см^3$ | Масса тела $m_{RT}$ , г | Коэффициент динамики рабочего тела $K_d$ |
|------------------------|-------------------|------------------------|-----------------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
|                        |                   | Длина стороны $a$ , см | Высота $h$ , см | Радиус основания $R$ , см |                                                |                                       |                              |                         |                                          |
| Тетраэдр               | RM 15/16 P        | 1,6                    | 1,31            | -                         | 0,16                                           | 0,52                                  | 0,48                         | 1,20                    | 0,13                                     |
|                        | RM 22/25 P        | 2,5                    | 2,04            | -                         | 1,46                                           | 0,81                                  | 1,84                         | 4,59                    | 0,32                                     |
|                        | RM 25/27 P        | 2,7                    | 2,20            | -                         | 2,14                                           | 0,88                                  | 2,32                         | 5,78                    | 0,37                                     |
|                        | RM 30/34 P        | 3,4                    | 2,78            | -                         | 6,79                                           | 1,10                                  | 4,63                         | 11,53                   | 0,59                                     |
|                        | RM 35/39 P        | 3,9                    | 3,18            | -                         | 13,48                                          | 1,26                                  | 6,99                         | 17,41                   | 0,77                                     |
| Шар                    | RM 2 G            | -                      | -               | 0,4                       | 0,04                                           | 0,40                                  | 0,27                         | 0,67                    | 0,06                                     |
|                        | RM 4 G            | -                      | -               | 0,6                       | 0,32                                           | 0,60                                  | 0,90                         | 2,25                    | 0,14                                     |
|                        | RM 6 G            | -                      | -               | 0,8                       | 1,37                                           | 0,80                                  | 2,14                         | 5,34                    | 0,26                                     |
|                        | RM 8 G            | -                      | -               | 1                         | 4,17                                           | 1,00                                  | 4,19                         | 10,43                   | 0,40                                     |
|                        | RM 10 G           | -                      | -               | 1,2                       | 10,38                                          | 1,20                                  | 7,24                         | 18,02                   | 0,58                                     |
|                        | RM 14 G           | -                      | -               | 1,4                       | 22,44                                          | 1,40                                  | 11,49                        | 28,62                   | 0,78                                     |
| Двояковыпуклая гранула | -                 | -                      | 0,4             | 0,8                       | 0,72                                           | 0,70                                  | 0,34                         | 0,83                    | 0,86                                     |
|                        | -                 | -                      | 0,3             | 0,6                       | 0,17                                           | 0,53                                  | 0,14                         | 0,35                    | 0,48                                     |
|                        | -                 | -                      | 0,25            | 0,5                       | 0,07                                           | 0,44                                  | 0,08                         | 0,20                    | 0,34                                     |
|                        | -                 | -                      | 0,5             | 1                         | 2,19                                           | 0,88                                  | 0,65                         | 1,63                    | 1,35                                     |
|                        | -                 | -                      | 0,75            | 1,5                       | 16,66                                          | 1,32                                  | 2,21                         | 5,50                    | 3,03                                     |
|                        | -                 | -                      | 1               | 2                         | 70,21                                          | 1,76                                  | 5,24                         | 13,04                   | 5,39                                     |
|                        | -                 | -                      | 1,25            | 2,5                       | 214,26                                         | 2,20                                  | 10,23                        | 25,46                   | 8,41                                     |
|                        | -                 | -                      | 1,5             | 3                         | 533,14                                         | 2,64                                  | 17,67                        | 44,00                   | 12,12                                    |

Для графической интерпретации и анализа данных, приведенных в табл. 1, на рис. 1 показано влияние массы полимерных гранул на ее приведенный радиус  $R_{пр}$ , характеризующий динамическое воздействие рабочих тел на обрабатываемые поверхности. Установлено, что рабочие тела в форме двояковыпуклой линзы обладают значительными технологическими преимуществами по сравнению с другими формами абразивных гранул. При одинаковой массе эти рабочие тела обладают большим моментом инерции и, соответственно, оказывают более интенсивное динамическое воздействие на обрабатываемый материал и ускоряют удаление неровностей и нивелирование поверхности.

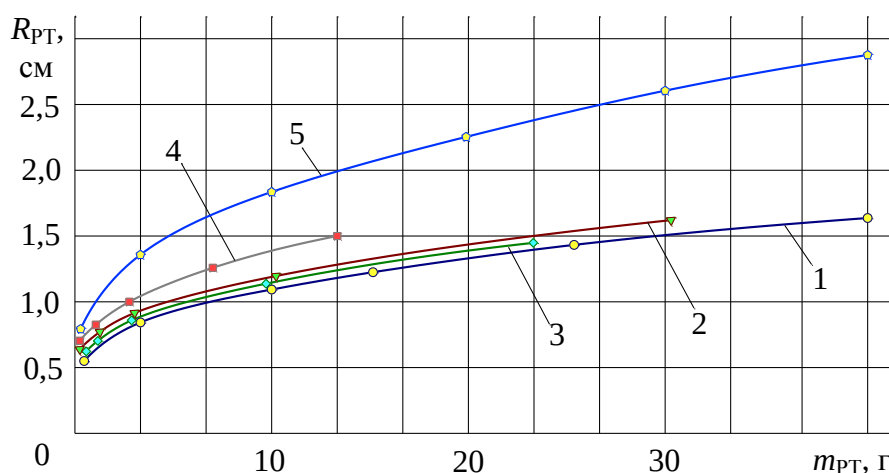


Рисунок 1 – Влияние массы  $m_{RT}$  полимерного рабочего тела на его приведенный радиус  $R_{пр}$ : 1 – цилиндрическая форма гранулы; 2 – коническая форма; 3 – шарообразная форма; 4 – тетраэдрическая форма; 5 – гранула в форме двояковыпуклой линзы

Для определения влияния насыпной плотности гранулированной среды на производительность обработки тяжелых деталей в контейнерах с планетарным вращением были проведены экспериментальные исследования на образцах из стали 45 в форме прямоугольных уголков с исходной шероховатостью  $Ra = 12,5$  мкм.

Для исследования были изготовлены две партии абразивных рабочих тел. Обе партии изготавливались из карбида кремния черного зернистостью М40 в форме одинаковых по размерам двояковыпуклых линз (рис. 2) с использованием в качестве связки состава на основе акриловых смол. Во второй партии в каждое рабочее тело при формовании имплантировался технологический предмет в виде стального шара, масса которого определялась по соотношению (3). Конструктивные и массовые параметры новых абразивных рабочих тел для обеих партий приведены в табл. 2.



Рисунок 2 – Абразивные рабочие тела в форме двояковыпуклой линзы

Таблица 2 – Характеристики абразивных рабочих тел

| № партии | Эскиз | Параметры           |                  |                 | Масса, г | Насыпная плотность $\rho_{гг}$ , кг/м <sup>3</sup> |
|----------|-------|---------------------|------------------|-----------------|----------|----------------------------------------------------|
|          |       | Угол $\beta$ , град | Диаметр $D$ , мм | Высота $h$ , мм |          |                                                    |
| 1        |       | 89                  | 22               | 9               | 4,5      | 1350                                               |
| 2        |       | 89                  | 22               | 9               | 5,5      | 1650                                               |

Обработка образцов в виде прямоугольных уголков осуществлялась на центробежно-планетарной установке ЦПУ-1002Э в течение 20 минут в водном растворе 2%-го технического мыла и 1,5%-й стеариновой кислоты. Частота вращения водила составляла  $150 \text{ мин}^{-1}$ , а степень заполнения контейнера 50 %. В один контейнер установки загружали пять образцов для обработки рабочими телами первой партии, а во второй пять образцов для обработки рабочими

талами второй партии. Измерение массы образцов до и после обработки осуществлялось на аналитических весах ВЛ Э1 34-М с точностью до 0,0002 г.

Результаты исследования производительности центробежной обработки различными абразивными гранулами (рис. 3) показали, что значительная интенсификация обработки может быть достигнута за счет увеличения разности плотностей гранулированной среды и обрабатываемых деталей путем изменения плотности рабочих тел.

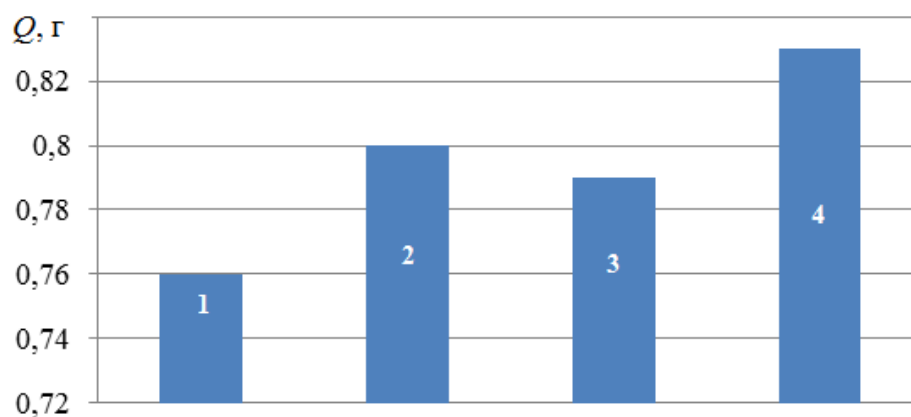


Рисунок 3 – Съем металла с обрабатываемых образцов при обработке различными гранулами: 1 – призмы трехгранные ПТ 10×10 (Московский абразивный завод), 2 – гранулы в форме тетраэдра RKV-15-P фирмы «Rösler», 3 – двояковыпуклые абразивные линзы, 4 – двояковыпуклые абразивные линзы с имплантированным шаром

Таким образом, применение новых абразивных гранул на полимерной связке позволяет расширить технологические возможности центробежной обработки деталей, в том числе с высокой насыпной плотностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверовицков В.З. Динамика центробежной обработки деталей дискретным или флюидальным материалом : Монография / В.З. Зверовицков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2005. – 200 с.
2. Комаров Д.Ю. Влияние насыпной плотности деталей на удельный съем металла при объемной обработке в контейнерах с планетарным движением / А.Е. Зверовицков, Д.Ю. Комаров // Научно-технические технологии в машиностроении и авиационном двигателестроении : Сб. тр. I Междунар. науч.-практич. конф. – Рыбинск : Изд-во РГТУ, 2012. – 384 с.
3. Понукалин А.В. Разработка гранулированных абразивных сред повышенной проникающей способности для объемной обработки деталей / А.В. Понукалин, А.Е. Зверовицков // Международная научно-техническая конференция «Проблемы автоматизации и управления в технических системах». – Пенза, 2011.
4. Понукалин А.В. Форма рабочих тел для объемной обработки в контейнерах с планетарным вращением / А.Е. Зверовицков, А.В. Понукалин // Научно-технические технологии в машиностроении и авиационном двигателестроении (2012-ТМ) : Материалы четвертой международной научно-технической конференции. – Рыбинск, 2012. – С. 276–280.
5. Пат. 2466007 Российская Федерация, МПК В24В31/104. Способ центробежной абразивной объемной обработки пустотелых деталей /

*Зверовицков В.З., Зверовицков А.Е., Комаров Д.Ю.; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. ун-т. – № 2011127192/02; заявл. 01.07.2011; опубл. 10.11.2012. Бюл. № 31.*

*6. Пат. 2470760 Российская Федерация, МПК В24В31/14. Абразивная гранула / Зверовицков В.З., Зверовицков А.Е., Понукалин А.В., Зверовицков Е.А.; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. ун-т. – № 2011118265/02; заявл. 05.05.2011; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.*

## **УДК 514**

### **ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЖИЗНИ ЧЕЛОВЕКА**

© *Л.А. Найниш, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (г. Пенза, Россия)*

© *Л.В. Ремонтова, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *С.А. Кочерова, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

### **IMAGE IN HUMAN LIFE**

© *L.A. Naynish, Penza State University of architecture and construction (Penza, Russia)*

© *L.W. Remontova, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *S.A. Kocherova, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассматривается роль изображения в жизни человека, его возникновение, функции и значение при освоении геометро-графических дисциплин.

**Ключевые слова:** изображение, чертеж, фиксация, хранение, общение, информация, геометрические модели.

The article discusses the role of images in a person's life, his appearance, function and significance in the development of the geometric-graphic disciplines.

**Key words:** image, draft, fixation, filing, contact, information, geometric models.

**E-mail:** nainish.larisa@yandex.ru, remontova@mail.ru, sveko2008@yandex.ru

В настоящее время существует тенденция сокращения учебного времени на освоение комплекса геометро-графических дисциплин, начиная со школы и кончая вузом. Это оправдывается тем, что существует достаточно компьютерных программ, которые позволяют создавать различные изображения. Да, это так. Но кто их создает? И сколько времени они изучали основные законы построения изображений? Что они знают об изображениях вообще? Насколько грамотно создают изображения эти компьютерные программы? Не окажется ли пагубным отсутствие на широком уровне умения грамотно создавать и пользоваться изображениями? Эти вопросы звучат как риторические. Но не потому, что ответ на них известен, а потому, что ответ на них мало кто знает. К сожалению, знания об изображениях не имеют широкого распространения. Итак, что такое изображение?

В толковых словарях понятию «изображение» дается несколько объяснений. Например, толковый словарь русского языка С.И. Ожегова и Н.Ю. Шведовой утверждает, что изображение – это «*предмет, рисунок, изображающий кого-либо или что-либо*». В приведенном определении авторы отразили языко-

вую норму как исторически складывающуюся и изменчивую категорию. Это позволило уже в словаре русского языка под редакцией А.П. Евгеньева и Г.А. Разумникова несколько расширить это толкование: «*изображение – это то, что изображено (рисунок, фотография, скульптура и т.п.)*». Следует предположить, что упомянутые авторы под «и т.п.» подразумевали и другие виды изображений, имеющих различное назначение и полученных различными способами. Эти предположения свидетельствуют о том, что формы и функции изображений в жизни человека очень разнообразны и представляют собой некую специальную языковую область.

Действительно, язык изображений один из самых древних языков человечества [3, 10, 16, 17]. Наши предки использовали его для фиксации и хранения разнообразной информации. Этот способ возник гораздо раньше, чем письменность в современном ее понимании. Выделение письменности и рисунка как способов фиксации и хранения информации позволяет выявить соответствие между синтетическим и аналитическим способами восприятия реальности. Аналитический способ породил современную письменность, синтетический – изображения.

Исторические аспекты возникновения и развития этих двух способов фиксации и хранения информации свидетельствуют о том, что далеко не всегда они развивались гармонично. Не вдаваясь в исторические подробности, заметим, что в настоящее время доминирует аналитический способ фиксации информации, который наряду со всеми своими достоинствами имеет и недостатки. К их числу следует отнести огромный объем накопившихся текстов. Ориентироваться в этом фактически бесконечном множестве крайне затруднительно. Наличие языкового барьера также существенно ограничивает доступ к необходимой информации, в то время как язык изображений является средством межнационального общения. Изображение, которое сделал индус, может быть понятно и русскому, и французу, и якуту. На основе этого возникла идея поиска контактов с внеземными цивилизациями. С помощью изображений земляне пытаются установить общение с жителями иных планет.

Язык изображений является также средством межвременного общения. Современному человеку понятны изображения, которые сделаны несколько тысячелетий назад. Мы получаем информацию об уровне развития древнейших цивилизаций по изображениям, которые они нам оставили. Такую же информацию получают о нас наши потомки, которые будут жить много веков спустя. Неоценимую роль играют изображения как фактор накопления культурных ценностей нашей цивилизации.

Современность показала еще и другую важную функцию изображений в жизни человека, связанную с восприятием реальности. Ее обуславливают следующие обстоятельства. Исходя из классификации периодов развития человеческой цивилизации, предложенной А.И. Субетто [14], сейчас мы живем в энергетической цивилизации, которая характеризуется резким скачком энерговооруженности человечества. Здесь налицо закон «искажения великодушных идей» Достоевского, в соответствии с которым благие намерения, не соответствующие законам реальности, оборачиваются катастрофическими последствиями, тогда как малая энергетика предыдущей вещественной цивилизации и большие компенсационные способности биосферы не ставили человечество на край гибели.

Весь драматизм энергетической цивилизации заключается в том, что возникла дисгармония между энергетическими возможностями преобразовательной деятельности человека и низкой предсказуемостью результатов этой деятельности. Общественный интеллект в настоящее время не обладает возможностью точного прогнозирования, потому что не владеет знанием законов об-

щения с реальностью. В историческом масштабе наступает «момент истины»: или общество освоит законы общения с реальностью, или оно будет неуклонно двигаться к катастрофе. Особенно остра эта проблема в настоящее время, когда рушатся привычные нормы существования. Нет нужды специально говорить, сколько произошло человеческих трагедий по этой причине.

Известно, что общение с реальностью в общих чертах определяется следующими моментами:

- 1) получение той или иной информации от реального объекта;
- 2) конструирование на ее основе моделей, часто представленных в различного вида описаниях, закономерностях и системах [4, 7, 12];
- 3) использование на практике разработанных моделей.

Но вот здесь следует обратить внимание на одну особенность. Все школьные предметы (кроме рисования) дают человеку уже готовые модели. Очевидно, что эти модели помогают человеку ориентироваться и выживать в окружающем его мире в тех случаях, когда события развиваются по известным законам. В этом смысле: чем больше человек получает таких моделей, тем выше его выживаемость. Но реальность бесконечно многообразна. И сколько не создавай моделей, их все равно будет мало. Чтобы человек мог легко ориентироваться в постоянно меняющейся действительности, он должен уметь сам создавать ее модели. Но, как правило, существующие методики обучения не предусматривают формирования навыков создания таких моделей. Это приводит к тому, что в нестандартных ситуациях человек теряется и принимает неправильные решения.

Конечно, из этого правила есть исключения. У некоторых людей существует природный талант непосредственного общения с реальностью. Они умеют получать необходимую информацию и конструировать нужные модели. Их принято считать творческими людьми. Других же обучают творческому мышлению по специальным методикам. Большинство таких методик основано на игре, в процессе которой обучающийся «как бы сам» конструирует давно уже созданные модели. Но здесь, к сожалению, имеется существенный недостаток: игра есть игра. Она помещает человека в искусственные условия, где он не сталкивается непосредственно с многообразием реальности. Кроме того, обучающихся по таким методикам людей не так уж много. Их число не составляет критическую массу. В результате их развитое творческое мышление в кризисные моменты не решает проблемы в целом.

Указанная проблема в некоторой степени может быть решена, если человека обучить графической грамоте, суть которой заключается в умении строить геометрические модели реальности [4, 7]. Изображая трехмерные объекты на плоскости, он учится самостоятельно получать геометрическую информацию и на ее основе создавать геометрические модели, которыми являются изображения. Иначе говоря, человек таким образом осваивает приемы непосредственного общения с реальностью. Они, конечно, не дают прямых способов решения политических, экономических и других подобных проблем, но косвенным образом способствуют их решению, так как приучают человека к мысли о том, что окружающий его мир постоянно меняется и дает бесконечно много самой различной информации. Они показывают: каким образом можно получить необходимую информацию и как на ее основе создать рабочую модель интересующего процесса.

Особенно важно умение работать с реальностью для категории специалистов, которых принято называть «проблемники» [2]. Они должны находить решение вопросов, охватывающих значительное количество дисциплин, наук, областей знаний; осуществлять поиск совершенно новых подходов в отдельных научно-технических областях; уметь организовать решение проблем, зависящих от различ-



ных отраслей. «Проблемники», которые имеют высокий уровень общетехнической и общегуманитарной подготовки, имеют широкую эрудицию. Они знакомы с новейшими достижениями и имеют знания в широком диапазоне смежных областей. Но этого бывает часто недостаточно, поэтому их эрудиция должна обогатиться навыками непосредственного общения с реальностью. Это позволит существенным образом повысить качество подготовки таких специалистов.

Сказанное позволяет сделать вывод о том, что функции изображений существенно расширились. Это не только способ фиксации и хранения информации, но и средство непосредственного общения с реальностью.

В зависимости от особенности фиксируемой информации все существующие изображения можно поделить на два вида: художественные и технические. Технические изображения, в свою очередь, подразделяются на четыре подвида: перспектива, аксонометрия, эпюр Монжа и проекции с числовыми отметками [1, 5, 8, 9, 13, 15].

Процесс создания этих изображений предполагает следующие отличия. Процесс создания художественных изображений называется рисованием. Его характерной чертой является игнорирование использования специальных инструментов для проведения линий. Процесс создания технических изображений называется черчением, где проведение различных линий требует использования специальных инструментов. Сейчас широкое распространение получили фотографии. Процесс получения этих изображений механизирован. В этом их сила и одновременно слабость. Сила – в том, что их создание (особенно с появлением цифровой фотографии) является чрезвычайно простым действием. Слабость же состоит в снижении взаимодействия создателя с реальностью.

Но при этом различии существует единое требование ко всем изображениям. Оно связано с их основной функцией: фиксацией информации. Если это художественные изображения, то они доставляют нам информацию о жизни людей, показывают красоту окружающего нас мира и т.п. Технические изображения фиксируют информацию о структуре технических устройств, о конструкции зданий и т.п. При этом изображенные объекты должны быть узнаваемы, иначе не имеет смысла весь процесс создания изображений. Узнавание в обоих случаях происходит потому, что трехмерный объект и его изображение посылают наблюдателю одну и ту же информацию. В данном случае – сведения о размерах, форме и положении в пространстве, т.е. геометрическую информацию. В этой связи возникает вопрос: по каким законам нужно создавать изображения, чтобы они сохранили всю геометрическую информацию исходного объекта?

Чтобы сформулировать эти законы, необходимо уточнить понятие «изображение». В толкованиях, приведенных в начале статьи, общим является рисунок. Рисунок, как известно, это отображение на плоскости или более сложной поверхности системы линий и пятен, в которых узнается исходный трехмерный объект. Аналогичное определение можно дать и чертежу. В его системе линий также можно узнать исходный объект. Далее термином «изображение» мы будем обозначать рисунок и чертеж.

Для формулировки закона необходимо ответить на вопрос: как же возникают изображения? Ответ на него люди искали с давних времен. Поиски Эвклида и Птолемея дали толчок к возникновению геометрической оптики. Несмотря на высокий уровень развития науки того времени, они создали достаточно нелепое учение о зрительных лучах. Проблема заключалась в том, что они не знали устройства глаза. Им оставался неизвестным факт высвечивания изображений на его сетчатке светом, который проходил через глазную линзу – хрусталик. Простейшим решением этой проблемы казалось представление о зритель-

ных лучах наподобие некоторых щупальцев, исходящих из глаз человека. Несмотря на всю причудливость этого воззрения, оно, несомненно, было полезным и прогрессивным для того времени, потому что позволяло построить относительно правильную теорию получения изображений, которая в результате просуществовала до семнадцатого века. Начиная с этого времени поиском ответа на вопрос о возникновении изображений занимаются физика, оптика, биология. Комплекс открытий в этих областях знания позволил дать иное объяснение процессу возникновения изображений, которое принято в настоящее время [3].

Каким же образом возникают изображения с точки зрения современной науки? Глазу дается направление лучей света, отраженного от окружающих предметов. Они высвечивают на задней стенке глаза изображения этих предметов. Такой подход позволил создать различные технические устройства, создающие изображения, похожие на те, которые видит глаз человека. Указанные технические и биологические устройства принято называть проекционными аппаратами. Несмотря на различие, каждый проекционный аппарат обладает в обязательном порядке следующими элементами:

- устройством, собирающим отраженные от объектов лучи в точку (хрусталик глаза, объектив фотоаппарата и т.п.);
- устройством, на котором высвечивается изображение (задняя стенка глаза, пленка фотоаппарата и т.п.).

Если отвлечься от конкретного устройства существующих проекционных аппаратов, то можно дать их геометрическое описание. В результате получим геометрический проекционный аппарат. Он состоит из точки и плоскости или поверхности. По традиции точка называется центром проецирования, плоскость или поверхность – картиной. Сама по себе эта конструкция не порождает никаких изображений. Ее необходимо дополнить еще алгоритмом.

Алгоритм состоит из следующих операций:

1. Исходный объект трехмерного пространства объединяют с центром проецирования. Так возникает проецирующий геометрический элемент.
2. Проецирующий элемент, пересекаясь с картиной, порождает на ней изображение (проекцию).

В результате работы этого алгоритма на картине получается плоское изображение трехмерного объекта.

Но сохраняет ли полученное таким образом изображение всю геометрическую информацию исходного объекта? Ответ отрицательный. В этом легко убедиться на следующем примере. Изобразим на плоскости окружность и попробуем ответить на вопрос: «какой трехмерный объект здесь изображен?». Однозначного ответа получить нельзя. Это может быть сфера, эллипсоид, конус или цилиндр, расположенные соответствующим образом к проекционному аппарату, и т.д. Как же быть в этом случае? Ответ дает сама природа. Все, что имеет глаза, имеет два глаза. Следовательно, нужно удвоить проекционный аппарат. Теперь каждый объект будет изображаться дважды.

Те, кто общается с художественными изображениями, могут резонно заметить, что второго изображения нет на художественных полотнах. Да, на первый взгляд это так. Но на них в качестве второго присутствует изображение света и тени, на грамотное воспроизведение которых художники тратят достаточно много времени. Они пытаются также изображать трехмерный мир на плоскости в своих линейных набросках, но тени там так или иначе присутствуют. Их изображают различной толщиной линии и прочими средствами, поиску которых художники часто отдают много сил и времени. Бывает, что и для технических

нужд достаточно одного изображения, но при этом обязательно присутствует информация, которая его заменяет.

Подводя итог, можно сказать, что изображения являются очень важной частью в жизни человека. Это средство фиксации и хранения информации, которое обладает большим преимуществом по сравнению с письменностью. Процесс создания изображений является средством непосредственного общения с реальностью. Знать окружающую действительность в лицо очень важно в ситуациях, когда она радикально меняется. Стоит ли сокращать количество учебных часов на освоение способов создания изображений? Едва ли это будет наилучшим решением проблемы образования, которое должно готовить квалифицированных специалистов, способных грамотно решать задачи, стоящие перед современным обществом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аничкин Б.А.. *Практическая перспектива : Учебное пособие.* – Саратов : Саратовский политехнич. ин-т, 1997. – 84 с.
2. Араго Ф. *Биография знаменитых астрономов, физиков, геометров.* – СПб., 1859. – С. 499–589.
3. Вавилов С.И. *Глаз и солнце.* – М. : Наука, 1976.
4. Вальков К.И. *Введение в теорию моделирования.* – Л. : ЛИСИ, 1974. – 151 с.
5. Вальков К.И. *Курс начертательной геометрии.* — Л. : ЛИСИ, 1970. – 101 с.
6. Вальков К.И. *Основы геометрического моделирования.* – Л. : ЛИСИ, 1987. – 247 с.
7. Волков Н.Н. *Восприятие предмета и рисунка.* – М., 1950. – 354 с.
8. Вольберг О.А. *Лекции по начертательной геометрии.* – М. : Учпедгиз, 1947. – 196 с.
9. Дюрер А. *Дневники. Письма. Трактаты.* – М. : Искусство, 1957. – 194 с.
10. Найниш Л.А. *Теория теней.* – Деп. в ВИНТИ, 2000. – 71 с.
11. Найниш Л.А. *Как изображать трехмерный мир на плоскости.* – Деп. в ВИНТИ, 2000. – 110 с.
12. Раушенбах Б.В. *Пространственные построения в живописи.* – М. : Наука, 1980. – 288 с.
13. Субетто А.И. *Социогенетика: системотехника, общественный интеллект, образовательная генетика и мировое развитие.* – М. : Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 1994. – 168 с.
14. Фёдоров М.В. *Рисунок и перспектива.* – М. : Искусство, 1960. – 200 с.
15. Флоренский П.А. *Обратная перспектива // Избранные труды по искусству.* – М. : Изобразительное искусство, 1996. – 285 с.
16. Ярхо В.Н. *Эсхил.* – М., 1958. – 256 с.

УДК 004.94:53.087.092

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ ИМИТАТОР СЧЁТЧИКА ЖИДКОСТИ  
«ЦЕНТРОСОНИК-М»**

© *И.А. Прошин, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *Е.С. Прошина, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *А.В. Васильков, ОАО «Научно-производственное предприятие «Рубин» (г. Пенза, Россия)*

© *В.В. Волков, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

**COMPUTER IMITATOR OF LIQUID COUNTER  
«CENTROSONIC-M»**

© *I.A. Proshin, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *E.A. Proshina, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *A.V. Vasilkov, Joint-stock company «Scientific-manufacturing Company «Rubin» (Penza, Russia)*

© *V.V. Volkov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассматриваются решения, положенные в создание компьютерного имитатора счётчика жидкости «Центросоник-М». Приводятся описание математической модели имитатора, UML-диаграмма активности и примеры диалога с оператором.

**Ключевые слова:** компьютерный имитатор, счётчик жидкости.

The paper reviews details of designs, based in developing of computer imitator of liquid counter “Centrosonic-M”. It gives mathematical model of the imitator, imitator UML activity diagram and examples of user dialogues.

**Key words:** computer imitator, liquid counter.

**E-mail:** vassilkov@mail.ru

В состав программного обеспечения интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий [1] входят компьютерные имитаторы датчиков, исполнительных механизмов, технологических объектов управления, предназначенные как для исследования в научных и учебных целях при управлении образовательным процессом по вектору знаний [2, 3], так и для наладки оборудования. В данной работе рассмотрен компьютерный имитатор для наладки технических средств дозирования топлива в процессе заправки жидкостных ракетных двигателей.

В процессе дозирования может быть применён счётчик жидкости "Центросоник-М" зарегистрированный в Госреестре средств измерений под № 29816-05, разработанный ЗАО "Центрприбор" [4]. Он предназначен для местного и дистанционного определения объёма и массы жидкости динамическим методом по ГОСТ 26976-86 непосредственно на потоке в продуктопроводах. Это высокоточный ультразвуковой прибор для коммерческого учёта массы и объёма жидкостей, в том числе нефтепродуктов. Такой счётчик устанавливают в систему дозирования заправочного комплекса.

При наладке технических средств заправочного комплекса требуется наличие дорогостоящего стендового оборудования в составе проливочного стенда и непосредственно счётчика жидкости "Центросоник-М". А если заправочный комплекс должен обеспечивать синхронную многоканальную заправку, то цена стенда возрастает многократно. Таким образом, применение компьютерного

имитатора счётчика жидкости "Центросоник-М" является решением задачи наладки управляющей части технических средств заправочного комплекса.

Рассмотрим решения, положенные в разработанный компьютерный имитатор счётчика жидкости "Центросоник-М", являющийся составной частью интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий. Компьютерный имитатор состоит из компьютера с подключенным преобразователем интерфейса RS-485 и программного комплекса имитатора расходомера "Центросоник-М" (свидетельство № 2012610987).

Основными параметрами имитации, которые вводятся оператором (рис. 1), являются:

- диаметр условного прохода трубы,
- среда,
- температура,
- рабочее давление.

**Настройка**

Центросоник-М    Имитатор    RS-485    **Условия**

Среда:  Диаметр (ДЧ):

|                                         |       |       |        |
|-----------------------------------------|-------|-------|--------|
| Давление                                | 2,5   | МПа   | *50 мм |
| Температура                             | 20    | °C    | *50 мм |
| Время сраб. клапана<br>малого расхода   | 2,5   | с     | 65 мм  |
| Время сраб. клапана<br>большого расхода | 2,5   | с     | *70 мм |
| Объем малого<br>расхода                 | 0,085 | м³    | 80 мм  |
| Плотность                               | 1000  | кг/м³ | 100 мм |
|                                         |       |       | 150 мм |
|                                         |       |       | 200 мм |
|                                         |       |       | 250 мм |
|                                         |       |       | 300 мм |
|                                         |       |       | 400 мм |

**Настройка**

Центросоник-М    **Имитатор**    RS-485    Условия

☐ Постоянные значения    ☒ Вносить погреш. измер.

☐ Вносить ошибку

| Параметр        | Значение | Ед.изм. | Δ. канала |
|-----------------|----------|---------|-----------|
| Объемный расход | 0        | м³/с    | 0         |
| Плотность       | 0        | кг/м³   | 0         |
| Объем           | 0        | м³      | 0         |
| Масса           | 0        | т       | 0         |
| Температура     | 0        | °C      | 0         |
| Время           | 0        | с       | 0         |
| Вязкость        | 0        | сСт     | 0         |

Рисунок 1 – Параметры имитации

Ниже приводится математическая модель массового и объёмного расхода жидкости, реализованная имитатором.

1. Расчёт температуры имитации производится по формуле

$$T = T_{\text{и}} + e, \quad (1)$$

где  $T_{\text{и}}$  – заданная температура имитации, °C;

$e$  – имитируемая случайная ошибка в диапазоне от –0,5 °C до 0,5 °C;

$T$  – текущая температура имитации с учётом случайных факторов, °C.

Ошибка, внесенная в значение температуры и носящая случайный характер, влияет на все остальные расчётные характеристики. Обработка информации осуществляется с использованием численных методов, рассмотренных в [5].

2. Расчёт плотности нафтила в соответствии с техническими условиями (ТУ 38.001244-81) и учётом (1) производится по формуле

$$\rho = 833,9 - 7,25^{-5} \cdot (T - 20), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

3. Расчёт плотности воды, амила и гептила производится с использованием табличных значений по формуле

$$\rho = \rho_n + \frac{\Delta\rho}{\Delta T}(T - T_n), \quad (3)$$

где  $\rho_n$  – плотность в начале диапазона температур, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta\rho$  – приращение плотности в диапазоне температур;

$\Delta T$  – диапазон температур.

3. Расчёт вязкости жидкости при заданной температуре (1) производится с использованием таблицы вязкости сред по формуле

$$M = M_n + \frac{\Delta M}{\Delta T}(T - T_n), \quad (4)$$

где  $M_n$  – вязкость в начале диапазона температур, сСт;

$\Delta M$  – изменение вязкости в диапазоне температур.

4. Расчёт объёмного расхода для ламинарного потока [6] за 1 с производится по упрощённой формуле

$$V = 0,01 \cdot \frac{\pi \cdot P}{2M^{-6}} \cdot R^4, \quad (5)$$

где  $M$  – вязкость, сСт;

$P$  – давление, атм;

$R$  – радиус условного прохода трубы.

5. Расчёт объёмного расхода с начала имитации производится по формуле

$$V_o = \sum_1^t V_i, \quad (6)$$

где  $V_i$  – объёмный расход за  $i$ -ую с;

$t$  – время, прошедшее с начала имитации, с;

$V_o$  – объёмный расход с начала имитации.

На рис. 2 приведена диаграмма активности программного комплекса имитатора счётчика жидкости "Центросоник-М".

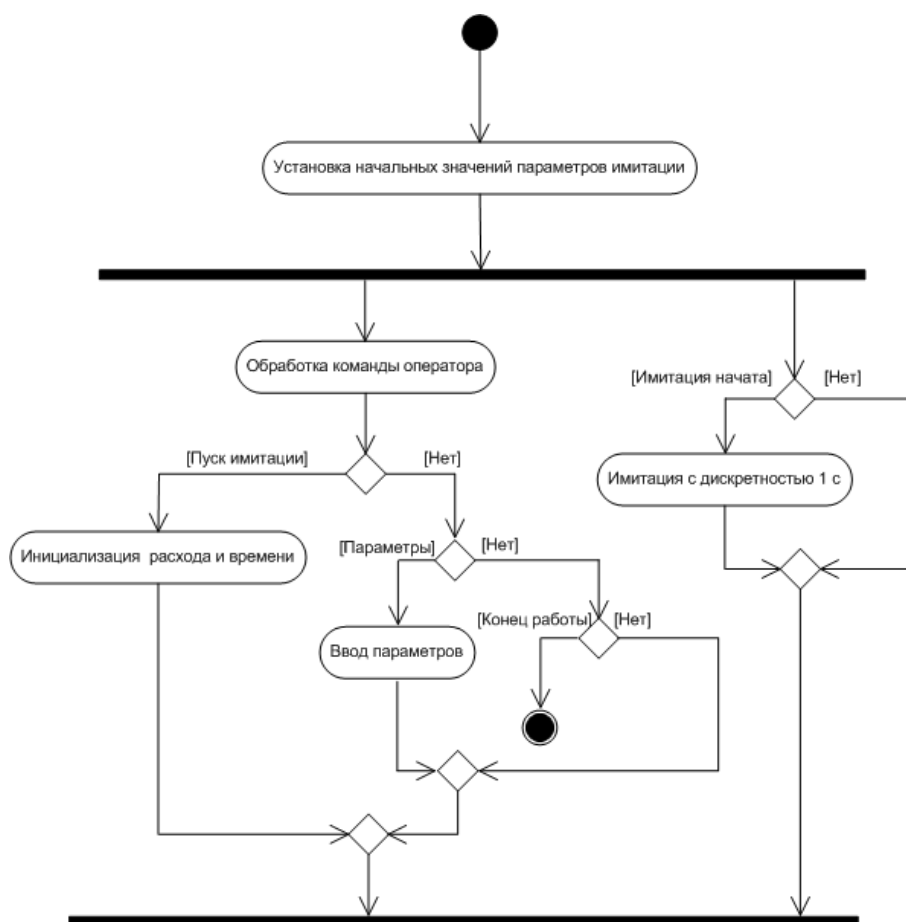


Рисунок 2 – Диаграмма активности программного комплекса имитатора расходомера "Центросоник-М"

Результаты расчётов (рис. 3), выполненные в соответствии с заложенной в программу математической моделью, оформляются в соответствии с протоколом информационного взаимодействия, приведённым в руководстве по эксплуатации счётчика жидкости "Центросоник-М". Компьютерный имитатор обеспечивает взаимодействие с техническими средствами заправочного комплекса посредством интерфейса RS-485.

В программном комплексе имитатора расходомера "Центросоник-М" реализована поддержка как оригинального протокола "Центросоник-М", так и протокола MODBUS [7].

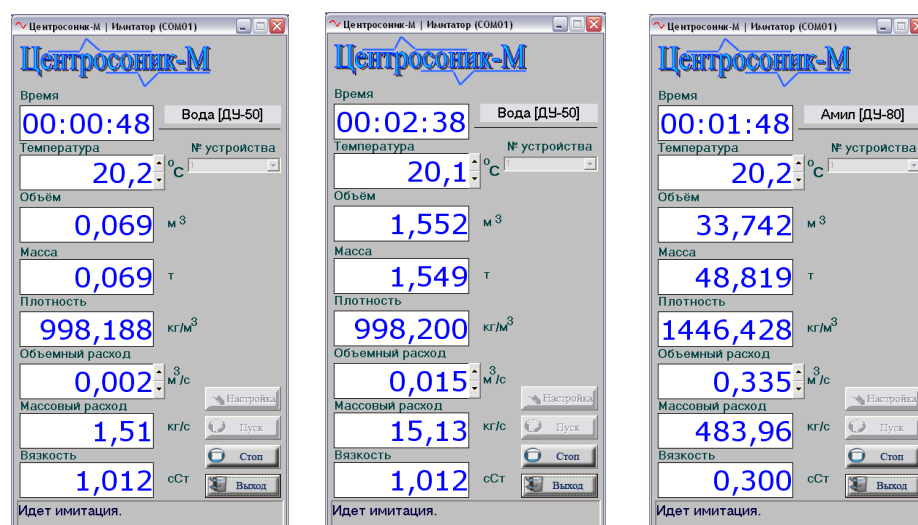


Рисунок 3 – Примеры окон программного комплекса имитатора расходомера "Центросоник-М" с текущими расчётными значениями расхода

Таким образом, компьютерный имитатор обеспечивает замену дорогостоящего оборудования в процессе разработки и наладки заправочного комплекса. Применение компьютерного имитатора в учебном процессе в качестве составной части ИКСАЛ для изучения и исследования технологических процессов, связанных с дозированием и измерением расхода жидкости, показало высокую эффективность и адекватность разработанных моделей, алгоритмов и комплекса программ имитатора расходомера "Центросоник-М".

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Концепция построения интегрированных комплексов сетевых автоматизированных лабораторий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 5(2). – С. 527–530.
2. Прошин Д.И. Подготовка высококвалифицированных кадров для предприятий машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. № 1–3. – С. 727–731.
3. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д., Сюлин П.В. Управление образовательным процессом подготовки кадров для машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. № 1(2). – С. 705–708.
4. Техническая документация счётчика жидкости "Центросоник-М". <http://centre-pribor.ru/rus/centrosonic/manual.html>.
5. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Структурно-параметрический синтез математических моделей объектов исследования по экспериментальным данным // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2009. – № 1. – С. 110–115. – (Морская техника и технология).
6. Bloomer, John J. Practical fluid for engineering applications. Marcel Dekker, Inc., 2000.
7. MODBUS application protocol specification (v 1.1b). [http://www.modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b.pdf](http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf).



УДК 656:51-7

**ТРЕНАЖЕРЫ МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ  
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

© *И.А. Гарькина, Пензенский государственный университет архитектуры  
и строительства (г. Пенза, Россия)*

© *А.М. Данилов, Пензенский государственный университет архитектуры  
и строительства (г. Пенза, Россия)*

© *И.А. Прошин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

**THE SIMULATORS OF MODULAR ARCHITECTURE  
FOR TRAINING OPERATORS OF TRANSPORT SYSTEMS**

© *I.A. Garkina, Penza State University of Architecture and  
Construction (Penza, Russia)*

© *A.M. Danilov, Penza State University of Architecture and  
Construction (Penza, Russia)*

© *I.A. Proshin, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

Предлагаются методологические принципы проектирования тренажеров модульной архитектуры для подготовки операторов мобильных систем. Особое внимание уделяется взаимодействию модулей и передаче данных от модуля к модулю. Обсуждаются вопросы использования многопроцессорных информационно-вычислительных комплексов с распараллеливанием вычислительных процессов в реальном масштабе времени.

**Ключевые слова:** транспортные эргатические системы, модульная архитектура, математическое моделирование, распараллеливание вычислительных процессов.

The methodological principles of designing the simulators of modular architecture for training operators of mobile systems are proposed. Particular attention is paid to the interaction of modules and data from module to module. The use of multiprocessor data-processing systems with parallelization of computational processes in real time is discussed.

**Key words:** ergatic transport systems, modular architecture, mathematical modeling, parallelization of computational processes.

**E-mail:** regas@pguas.ru

Современные тренажеры являются эффективными и безопасными средствами не только при первоначальном обучении, но и повышении мастерства операторов, переучивании и поддержании их квалификации. Основными потребителями являются учебные центры по подготовке летчиков, центры переучивания и сертификации пилотов гражданской авиации для работы на зарубежных типах самолетов, центры подготовки специалистов флота, учебные заведения железнодорожного транспорта; отмечается целесообразность создания тренажных комплексов для операторов АЭС и опасных химических производств; для обучения и поддержания навыков вождения автомобильным транспортом [1...7]. Ярким примером подготовки специалистов по эксплуатации автомобильной техники и ремонтных подразделений служит использование уникального по своим возможностям тренажерного комплекса ТВ-543, предназначенного для обучения и поддержания навыков вождения механиков-водителей многоосного колесного тягача на базе МА3-543 без расхода моторесурса и горюче-смазочных материалов. Приобретение оператором необходимых навыков с наименьшими затратами материальных средств позволяют компьютерные технологии. По мнению методистов, 10...15 % учебного времени, отведенного на практические занятия за рулем автомобиля, необходимо заменять обучением на автотренажере.

Задачи имитации заключаются в воспроизведении штатных условий функционирования транспортных средств, предпосылок возникновения особых ситуаций и их протекания как при правильных, так и неправильных действиях оператора в принятом для имитации диапазоне ожидаемых условий эксплуатации. Одним из наиболее сложных и важных этапов в создании тренажеров является разработка имитатора движения транспортного средства (в авиационных тренажерах – имитатора динамики полета). Он связан с построением рациональных математических моделей на базе гибкого модульного программно-математического обеспечения, автоматизации проектирования и испытаний, разработки методик идентификации и корректировки моделей по различным классам транспортных средств. Естественно, структура модели должна обеспечить возможность корректировки выходных характеристик тренажера под реальные технические характеристики объекта, а также оператора [8, 9]. Требуемая точность моделирования технических характеристик будет определяться по заложенным в техническом задании обучающим свойствам тренажера (в соответствии с разработанными критериями по всем режимам функционирования транспортных средств и из условий формирования полноценных профессиональных навыков при обучении на тренажере). Имитационные свойства тренажера должны оцениваться на основе объективных показателей, непосредственно связанных с результирующими характеристиками управления объектом с учетом основных эргономических характеристик (методика формирования объективных оценок должна предусматривать возможность сравнения групп показателей для условий тренажера и объекта). Достижение совпадения управляющих воздействий оператора в условиях тренажера и реального объекта практически невозможно (тренажер будет не менее сложным, чем сам объект). Так что реальной является возможность формирования у оператора на тренажере ложного навыка по управлению объектом (принято считать, что число выходов на тренажер не должно превышать семи). Пока в большинстве случаев нет методов по определению допусков на показатели даже эталонного управления («идеальным оператором»; характеризуется программой (непрерывными и дискретными показателями, определяемыми во временной области, а также рядом функций от параметров состояния)). Поэтому при оценке имитационных характеристик тренажера данные по управлению объектом используются лишь на уровне качественного анализа.

На сегодня считается общепризнанным необходимость разработки тренажеров с использованием концепции модульности (предполагается возможность объединения, разделения и модификации отдельных элементов без их влияния на систему в целом). При модульной архитектуре систем модули могут создаваться независимо друг от друга и объединяться в блоки для получения необходимых результатов. Облегчается их реконструкция и модернизация при изменении требований к ним без существенного воздействия на другие модули (например, при изменении тормозной системы летательного аппарата можно ограничиться соответствующими изменениями в модуле «Тормозная система» авиационного тренажера). Однако усилия по модульному построению систем не достигнут цели без четкого определения взаимосвязей между модулями, требований для разработки и внедрения модулей, а также элементов интерфейса (позволяющих введение новых технологий с учетом взглядов их создателей, а также эксплуатирующих организаций). Однозначно вряд ли можно установить экономическую целесообразность выбора модульного принципа построения тренажера, но во многих случаях возможно достичь уменьшения риска, сокращения сроков исполнения и стоимости разработок. По-видимому, максимальные ре-

зультаты при модульном построении будут получены при разработке тренажера на базе уже существующих модулей.

Многие элементы модульности (модули пилотажных приборов, силовой установки, подвижности; кабина, вычислитель, пульт инструктора и др.) уже используются в современных тренажерах. Отдельные модули, поставляемые различными фирмами, объединяются у головного исполнителя. Это дает возможность получения основных компонент тренажера при лучших соотношениях «цена, прибыль, качество» при создании конкретного. Однако до последнего времени объединение модулей традиционно требовало больших временных и финансовых затрат (иногда ожидаемая выгода не достигалась или требовались чрезмерные усилия). Налицо обмен в тренажере большими потоками различной информации. Необходимая реалистичность моделирования требует достаточно быстрой реакции на входные воздействия, что вызывает большие нагрузки на вычислительную систему по обработке данных (при дополнительных трудностях, связанных с соответствием данных основным форматам). Трудности вызываются и необходимостью выполнения всех операций в реальном масштабе времени.

Модульный подход налагает дополнительные ограничения, связанные с приведением данных в совместимую форму, на систему в целом. Однако если указанные проблемы будут решены, то присущая модульному подходу гибкость будет значительно перекрывать указанные ограничения по обработке данных. Вычисления могут распределяться между различными процессорами.

Существует потенциальная опасность выбора узкоспециализированного подхода с определением некоторой архитектуры ЭВМ и установкой жесткой структуры интерфейса с применением специального языка программирования. Должна существовать возможность создания новых необходимых модулей на основе единого подхода для обеспечения совместимости модулей друг с другом.

При модульном подходе модули и интерфейс могут рассматриваться с функциональной точки зрения (логический уровень), или система рассматривается как набор аппаратных и программных модулей (физический уровень). Передача информации может интерпретироваться как ряд сообщений между функциональными модулями, поэтому на логическом уровне рассматривается содержание сообщений, определяются передающие и принимающие модули, а также условия, при которых осуществляется передача сообщений. На этом же уровне определяются вопросы точности и объекты моделирования. Здесь не определяются характеристики ЭВМ, языки программирования, среда, в которой передаются сообщения. Физический уровень – среда, в которой существуют и взаимодействуют модули. На этом уровне рассматриваются скорости передачи данных, обнаружение и исправление ошибок, объем памяти, аппаратные средства связи, типы ЭВМ, языки программирования и др. (типы тренажеров (специализированные, функциональные или комплексные), функции, которые осуществляют модули, на этом уровне не рассматриваются). Указанное разделение позволяет достичь основной цели – разделить указанные уровни так, чтобы изменения на одном уровне не вызвали изменений на другом. Так, можно модернизировать модули акселерационных эффектов, визуализации, установить другие ЭВМ и т.д. без изменения логической структуры тренажера или наоборот, использовать различные элементы физического уровня для создания конкретных тренажеров.

Решение вопроса о взаимодействии модулей на самом деле является решением задачи передачи данных от модуля к модулю. Для их связи необходима схема сопряжения (в идеале – универсальная). Если принимающий и передающий элементы системы находятся в различных физических модулях, то информация может передаваться через локальные сети. Если элементы расположены в

тесно взаимодействующих физических модулях (например, две ЭВМ одной системы), то сообщения могут передаваться через устройства внешней памяти или высокоскоростную сеть передачи данных. Если оба логических модуля находятся внутри одного физического, то информация может передаваться через операционную систему. При этом во всех случаях сообщения должны быть одинаковыми по объему, формату и условиям передачи. Если передающий и принимающий логические модули находятся в одном физическом модуле, то среда передачи информации может быть выбрана создателем модуля. Если они находятся в тесно взаимодействующих физических модулях, то способ их связей определяется создателями модулей. Если логические модули располагаются в различных физических модулях, созданных различными фирмами, то связь между этими физическими модулями определяется головным разработчиком. Формы физической связи могут быть различными. Выбор универсальной физической связи является одной из основных задач головного разработчика тренажеров (основа модульного подхода на целый ряд лет).

Специального рассмотрения при модульном подходе требует вопрос программного обеспечения. Наибольшие усилия затрачиваются на обеспечение мобильности программного обеспечения. В идеале желательно иметь прикладные программы, все написанные с использованием одного языка с возможностью реализации на любом процессоре. Как и аппаратные средства, языки постоянно совершенствуются, модернизируются, создаются новые. Доля стоимости математического обеспечения в общей стоимости тренажера постоянно возрастает.

Во избежание сложности внедрения технических новшеств, требования к модулям, интерфейсу и др. не должны быть чрезмерно жесткими и замыкаться на существующих технологиях. Залог успеха – в создании достаточно гибких модулей и системы в целом. Модуль должен определяться функционально. При определении модулей, интерфейса, утверждении стандартов (для исключения разногласий) головная организация, координируя деятельность подрядчиков, должна исполнять и роль эксперта. Естественно, в составе комплексного тренажера будут все модули, входящие в специализированные тренажеры. Отдельный функциональный модуль тренажера при этом можно разрабатывать как законченное изделие, представляющее собой основу специализированного тренажера (например, летчика, бортинженера, штурмана, оператора). Одновременно предусматривается возможность применения этого модуля в составе комплексного тренажера. Для объединения тренажерных модулей в комплексный тренажер необходимо определить функциональные связи, т.е. состав и структуру массивов информации, которыми должны обмениваться между собой тренажерные модули. Устройства сопряжения должны быть стандартизированы. Функциональные модули целесообразно реализовывать в одном вычислительном комплексе. В качестве примера на рисунке 1 приводятся связи между отдельными модулями авиационного тренажера (сохраняются как унифицированные для всех типов тренажеров). Количество вычислительных комплексов, используемых в каждом модуле, не должно менять структуру связей с другими модулями. Если резерва в данном устройстве коммутации больше нет, то вводимые дополнительно вычислительные комплексы должны связываться с основным вычислителем модуля с помощью автономных средств (например, с помощью дополнительного внутримодульного устройства коммутации).

Нормальное функционирование тренажера, т.е. информационная и динамическая адекватность модели, могут быть достигнуты только при условии правильного формирования информации, необходимой для получения полноценных профессиональных навыков. Это условие может быть выполнено при

учете психофизиологии труда при создании функциональных модулей, формирующих необходимую информацию.

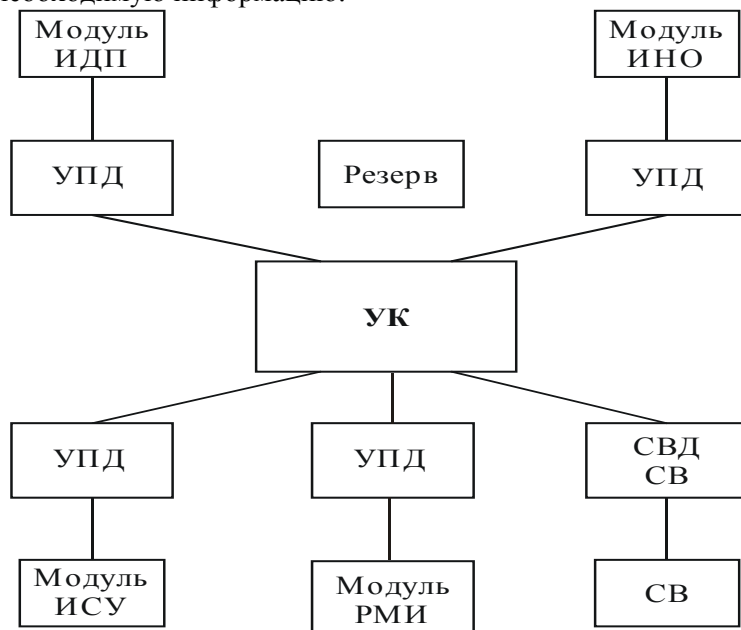


Рисунок 1 – Структурная схема сопряжения имитаторов пилотажно-навигационного тренажера:

УПД – устройство передачи данных, ИДП – имитатор динамики полета, ИСУ – имитатор силовой установки, ИНО – имитатор навигационной обстановки, РМИ – рабочее место инструктора, СВД СВ – система выдачи данных системы визуализации, СВ – система визуализации, УК – устройство коммутации

Организация вычислительного процесса в базовом вычислителе тренажера связана с решением и других не менее важных задач: группировка функций однотипного аргумента для совместной обработки (обработанные данные не должны отличаться от исходных более чем на заданную величину погрешности); переаргументация функций, сортировка, сложение и умножение функций на константу, усреднение и т.д. (выходными документами системы являются графики обработанных функций, таблицы технических характеристик, машинные носители информации, выпускаемые в структуре базового вычислителя) для уменьшения количества аргументов (обычно до трех). По результатам обработки исходной информации и определяются технические характеристики объекта (режим реального времени, интерактивная процедура отображения).

#### Заключение

1. Предлагаются методологические принципы создания с использованием системного подхода тренажеров модульной архитектуры для транспортных систем.
2. Приводятся варианты модульного построения тренажеров: структура, состав, а также взаимосвязи информационно-вычислительных систем с распараллеливанием вычислительных процессов.
3. Результаты исследований использовались при разработке тренажеров по подготовке операторов различных транспортных систем, в том числе динамических стендов и комплексных тренажеров самолетов, широко используемых для подготовки летного состава в учебно-тренировочных центрах как гражданской, так и военной авиации.

4. Приведенные принципы разработки тренажеров мобильных систем могут использоваться при проектировании различных управляемых в пространстве динамических систем.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гарькина И.А., Данилов А.М., Лапшин Э.В., Юрков Н.К. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1(9). – С. 3–11.
2. Данилов А.М., Гарькина И.А., Домке Э.Р. Математическое моделирование управляющих воздействий оператора в эргатической системе // Вестник МАДИ. – 2011. – № 2. – С. 18–23.
3. Гарькина И.А., Данилов А.М., Пылайкин С.А. Транспортные эргатические системы: информационные модели и управление // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 1(40). – С. 115–122.
4. Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Совершенствование динамических стендов авиационных тренажеров на базе гидроприводов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 12. – С. 18–22.
5. Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Тренажер вертолета с имитацией посадки на взволнованную водную поверхность // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 9. – С. 65–69.
6. Прошин И.А., Савельев А.В. Моделирование движения динамического стенда авиационного тренажера с компенсацией нагрузки // В мире научных открытий. – 2010. – № 4–9. – С. 135–137.
7. Прошин И.А., Сапунов Е.А. Имитационная модель законов управления динамическими системами // В мире научных открытий. – 2010. – № 4–9. – С. 152–154.
8. Данилов А.М., Домке Э.Р., Гарькина И.А. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 2 (70). – С. 5–11.
9. Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Моделирование с позиций управления в технических системах // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2(16). – С. 138–143.

**УДК 621.715.2**

#### **КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РАЗВЕРТОК**

© **В.В. Булавин**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **В.Б. Моисеев**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### **CONSTRUCTION OF WORKING CARBIDE TIPPED REAMERS**

© **V.V. Bulavin**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **V.B. Moiseev**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В статье рассмотрены варианты конструктивных твердосплавных элементов составных разверток, методы их соединения с хвостовиком, степень влияния на работоспособность, прочность соединительного шва и зависимость её от температуры нагрева.

**Ключевые слова:** твердосплавной элемент, хвостовик, соединительный шов, износ, скорость резания, глубина резания, подача, стойкость, напряжение сдвига.

## КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РАЗВЕРТОК

The article considers the options for the design elements of composite carbide reamers, methods of connection to the shank, the degree of influence on the performance, the strength of the connecting joint and its dependence on the heating temperature.

**Key words:** carbide element, shank, connecting seam, wear, cutting speed, depth of cut, feed, resistance, shear stress.

**E-mail:** bulavin4545@mail.ru

Главная задача, возникающая при проектировании твердосплавного режущего инструмента, это, наряду с правильным назначением марки твердого сплава, выбор оптимальной конструкции режущих элементов и метода их крепления к корпусу. В первую очередь именно этим обеспечиваются высокие эксплуатационные качества режущего инструмента.

Рабочая часть твердосплавных разверток может быть оформлена по одному из следующих трех конструктивных вариантов [1], представленных на рис. 1: в виде твердосплавных пластинок, прикрепляемых к зубьям корпуса из конструкционной стали (рис. 1,а); в виде твердосплавной втулки с коническим отверстием, которым она насаживается на хвостовик из конструкционной стали (рис. 1,б); в виде твердосплавной вставки с коническим стержнем, которым она вставляется в коническое отверстие хвостовика (рис. 1,в).

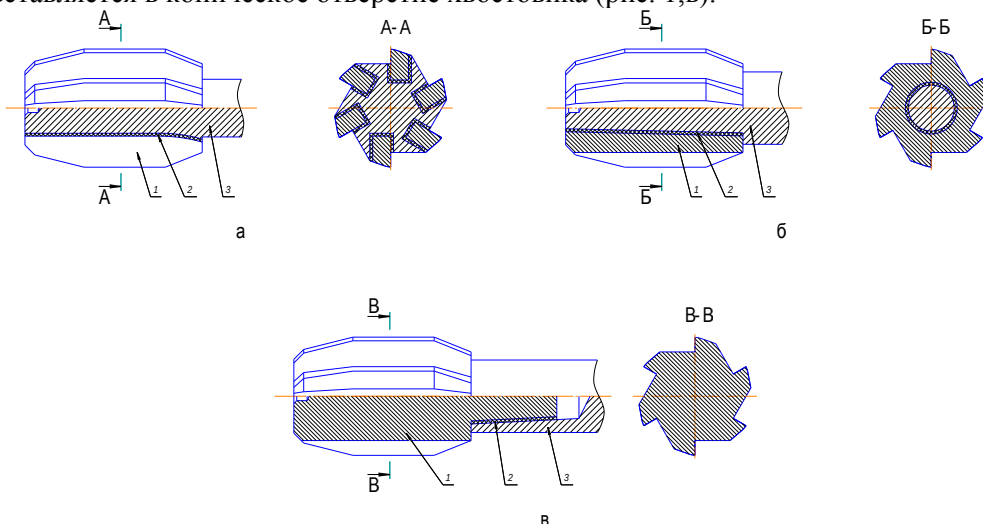


Рисунок 1 – Варианты рабочей части разверток с твердосплавными элементами в виде пластин (а), втулок (б) и вставок (в):

1 – твердосплавный элемент; 2 – соединительный шов; 3 – хвостовик

При решении вопроса об оптимальном конструктивном варианте твердосплавных элементов определяющими являются следующие факторы:

- эксплуатационные свойства инструмента,
- способность режущих элементов воспринимать рабочие нагрузки.

В настоящем исследовании устанавливалось влияние конструктивного оформления твердосплавных элементов разверток на их износостойкость. Для этого использовались развертки диаметром 10,2 мм, которые имели твердосплавные элементы: в виде пластинок (1), в виде втулок (2) и в виде вставок (3). Соединение их с хвостовиком производилось двумя способам: припаиванием латунью Л68 и приклеиванием клеем ВК20. В первом случае, при соединении припоем, было принято условное обозначение для разверток Ап, Бп, Вп; во втором случае, при соединении клеем, – Ак, Бк, Вк.

Развертывание отверстий выполнялось в чугуновых заготовках СЧ25 без применения СОЖ на скорости резания 0,5 м/с, с глубиной резания 0,15 мм и по-

дачей 0,48 мм/об. Твердосплавные элементы изготавливались из сплава ВК6М и имели следующие геометрические параметры режущей части:  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\varphi = 5^\circ$ .

Кривые износа (рис. 2) показывают, что конструктивное оформление твердосплавной рабочей части развертки оказывает существенное влияние на ее износостойкость, когда режущие элементы припаиваются к хвостовику, и практически не оказывает влияние на ее износостойкость, если присоединение режущих элементов к хвостовику производится клеем.

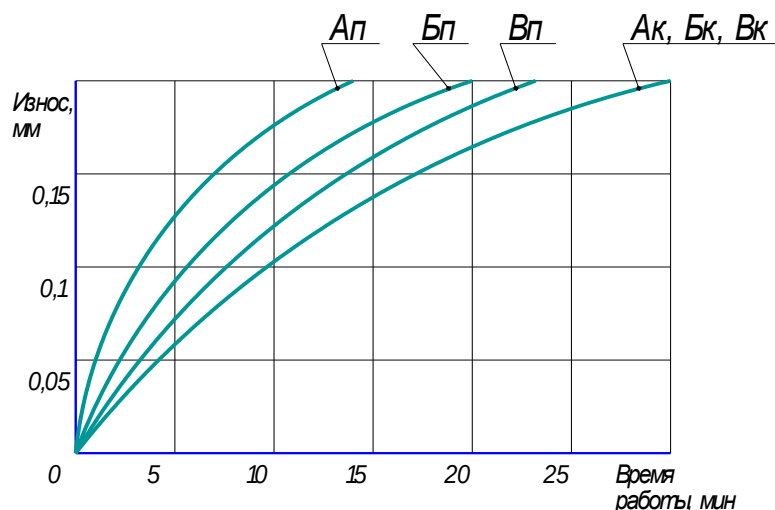


Рисунок 2 – Кривые износа разверток ( $V = 0,5$  м/с,  $t = 0,15$  мм,  $S = 0,48$  мм/об):

*Aп – с припаянными пластинами; Бп – с припаянной втулкой; Вп – с припаянной вставкой; Ак – с приклеенными пластинами; Бк – с приклеенной втулкой; Вк – с приклеенной вставкой*

Из числа паяных разверток наибольшую работоспособность показали развертки, оснащенные твердосплавными элементами в виде вставки (Вп), стойкость которых составила 23 минуты. Наименьшая стойкость 14 минут была у разверток с твердосплавными элементами в виде пластинок (Ап). Развертки с твердосплавными элементами в виде втулки (Бп) заняли промежуточное положение. Их стойкость составила 20 минут.

Все три конструктивных варианта клеевых разверток (Ак, Бк, Вк) показали практически равную стойкость – 30 минут.

Анализируя результаты опытов, можно сказать, что износостойкость твердосплавных разверток определяется как способом соединения твердосплавных элементов с хвостовиком, так и самой конструкцией твердосплавных элементов.

Самым слабым звеном развертки с твердосплавными элементами является место соединения последних с хвостовиком. Напряжения, возникающие в соединительном шве [2], зависят от площади контакта, их формы и расположения относительно составляющих силы резания.

В развертке, оснащенной твердосплавными пластинками, расположенными в пазах корпуса (рис. 3), тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$ , составляющие силы резания воспринимаются стенкой и дном паза. Под действием же осевой составляющей  $P_o$  пластинки могут сдвинуться вдоль пазов корпуса.



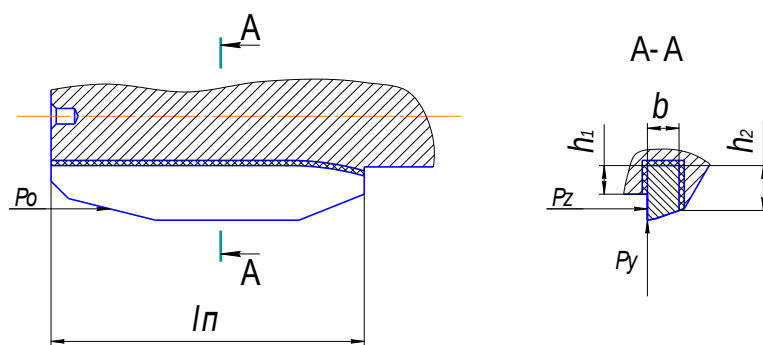


Рисунок 3 – Соединение твердосплавной пластины с хвостовиком развертки

Следовательно, такое соединение необходимо рассчитывать на сдвиг, учитывая возможность перемещения твердосплавных пластинок в пазах корпуса в направлении оси развертки. Напряжение сдвига от осевой силы  $P_o$  будет

$$\tau_{cd1} = \frac{P_o}{z \cdot F_{cd1}}, \quad (1)$$

где  $z$  – число зубьев развертки;

$F_{cd1}$  – площадь заделки пластинки, определяемая из уравнения

$$F_{cd1} = l_n \cdot (h_1 + b + h_2), \quad (2)$$

$l_n$  – длина твердосплавной пластинки;

$h_1, b, h_2$  – размеры, определяющие заделку твердосплавной пластинки в корпус.

Окончательно

$$\tau_{cd1} = \frac{P_o}{z \cdot l_n \cdot (h_1 + b + h_2)}, \quad (3)$$

В развертке с твердосплавной втулкой, насаженной на шейку хвостовика (рис. 4), в действие вступает тангенциальная составляющая  $P_z$ , создающая крутящий момент  $M$ , который стремится провернуть втулку относительно шейки хвостовика.

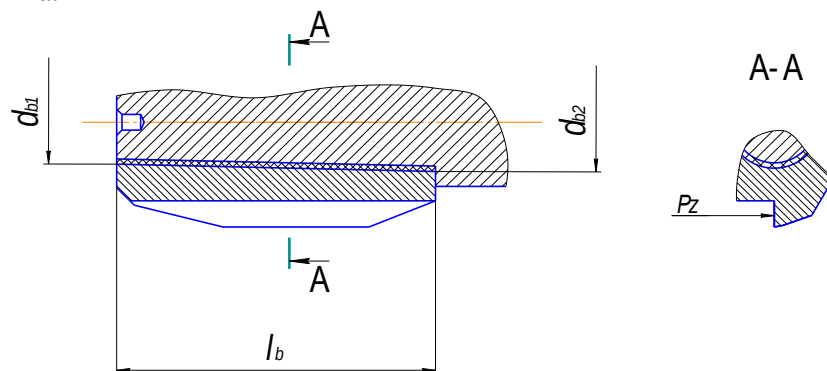


Рисунок 4 – Соединение твердосплавной втулки с хвостовиком развертки

Напряжение сдвига при этом определится по формуле

$$\tau_{cd_2} = \frac{P_z}{F_{cd_2}}. \quad (4)$$

При диаметре рабочей части развертки  $D$

$$P_z = \frac{2 \cdot M}{D}, \quad (5)$$

а площадь сдвига (площадь поверхности конического отверстия твердосплавной втулки длиной  $l_b$  с диаметрами  $d_{b1}$  и  $d_{b2}$ )

$$F_{cd_2} = \pi \cdot l_b \cdot \frac{d_{b1} + d_{b2}}{2}. \quad (6)$$

Окончательно

$$\tau_{cd_2} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D \cdot l_b \cdot (d_{b1} + d_{b2})}. \quad (7)$$

В развертке с твердосплавной вставкой, закрепленной в коническом отверстии шейки хвостовика (рис. 5), действие крутящего момента  $M$  от тангенциальной составляющей  $P_z$  сводится к стремлению твердосплавной вставки проворачиваться относительно отверстия в хвостовике.

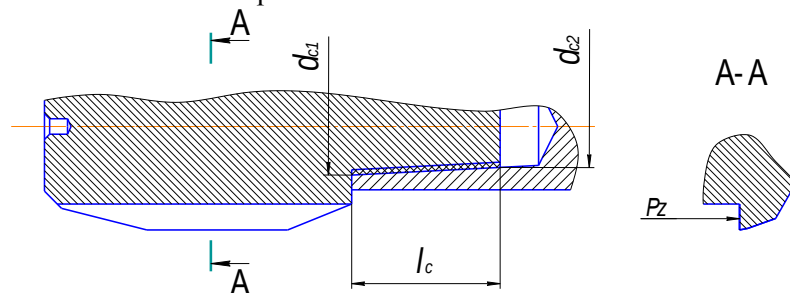


Рисунок 5 – Соединение твердосплавной вставки с хвостовиком развертки

Напряжение сдвига по аналогии с предыдущим определится по формуле

$$\tau_{cd_3} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D \cdot l_c \cdot (d_{c1} + d_{c2})}, \quad (8)$$

где  $l_c$ ,  $d_{c1}$  и  $d_{c2}$  – размеры, определяющие заделку твердосплавной вставки в отверстие хвостовика.

Напряжения сдвига, возникающие в соединительном шве под действием сил резания, для всех диаметров развертки при конструктивном оформлении (рис. 1,б) и (рис. 1,в) невелики; а при конструктивном оформлении (рис. 1,а) практически ничтожны.

Так, при развертывании отверстий диаметром 10,2 мм в чугуне СЧ25 ( $V = 0,5$  м/с,  $t = 0,15$  мм,  $S = 0,48$  мм/об) напряжения в соединительном шве по формулам (3, 7 и 8) составляют:  $\tau_{cd_2} = \tau_{cd_3} = 1,5$  МПа и  $\tau_{cd_1} = 0,05$  МПа. В то

время как предел прочности на сдвиг для соединений клеем ВК20 составляет 8,5 МПа (табл. 1), что значительно превышает напряжения, возникающие в соединительном шве. Для соединений латунным припоем Л68 предел прочности на сдвиг еще выше и составляет 198 МПа. Таким образом, клеевое соединение обеспечивает надежное крепление режущих твердосплавных элементов развертки при любом конструктивном варианте.

## КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РАЗВЕРТОК

Клей ВК20 обеспечивает длительное хранение соединений и их многократный нагрев. Так, испытания, проведенные после одного года хранения клеевых разверток, показывают, что прочность соединения на сдвиг уменьшилась лишь в среднем на 10 %, а после 500-кратного нагрева до температуры 150 °С – на 6 % (табл. 1). Здесь 150 °С – рабочая температура в клеевом шве, а 500 – среднее количество отверстий, обработанных за период стойкости развертки.

Таблица 1 – Прочность соединения клеем ВК20 твердосплавных рабочих элементов (ВК6М) с хвостовиком (сталь 45) развертки

| Условия испытания                | Температура испытания $Q_{II}$ , °С         |      |     |     |     |
|----------------------------------|---------------------------------------------|------|-----|-----|-----|
|                                  | 20                                          | 100  | 150 | 200 | 250 |
|                                  | Предел прочности на сдвиг $\tau_{сд}$ , МПа |      |     |     |     |
| После полимеризации клеевого шва | 16,0                                        | 10,5 | 8,5 | 7,1 | 5,9 |
| После года хранения              | 14,5                                        | 9,5  | 7,6 | 6,3 | 5,2 |
| После 500-кратного нагрева       | 16,0                                        | 10,0 | 8,0 | 6,7 | 5,4 |

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булавин В.В. О присоединении режущих элементов в твердосплавных развертках // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1975. – № 9. – С. 189–191.
2. Булавин В.В. Динамика развертывания // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1975. – № 10. – С. 166–167.

УДК 677.05+004.92

### ГЕОМЕТРИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТАЗОВ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ МАШИНЫ ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКОГО ДВУХКОНДЕНСЕРНОГО (ФРИКЦИОННОГО) СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ ПРЯЖИ

- © **И.И. Привалов**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)
- © **Е.Ю. Юдина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)
- © **А.В. Иванов**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)
- © **Р.Ф. Сатаева**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

### GEOMETRY OF THE ARRANGEMENT OF CYLINDRICAL TEXTILE BASINS WHEN DESIGNING THE MACHINE OF THE FRICTIONAL WAY OF FORMATION OF THE YARN

- © **I.I. Privalov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)
- © **Ye.Yu. Yudin**, Penza State Technological University (Penza, Russia)
- © **A.V. Ivanov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)
- © **R.F. Satayeva**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Для более производительной, в сравнении с серийными аналогами прядильной машины, выбрана конструктивная база и даны рекомендации по уменьшению занимаемой площади за счет изменения геометрии расстановки цилиндрических тазов с волокнистой лентой.

**Ключевые слова:** конструктивная база, тазы с волокнистой лентой, оси оснований цилиндров, прорисовка геометрии расположения.

Friction spinning more productive in comparison with rotary. The explanation of choice constructive base friction machines on the basis of serial rotary machines. Recommendations on reduction of the area occupied by the projected machine, due to the improved alignment of textile basins with sliver.

**Key words:** textile basin with sliver, axes of the basis of cylinders, geometrical arrangement of cylinder textile basin with.

Большинству безверетенных прядильных машин свойственны общие черты: диаметр таза от 200 до 400 мм (тазы цилиндрической формы устанавливаются под прядильными устройствами), ширина готовой паковки с пряжей 150 мм, шаг расположения прядильных мест от 195 до 240 мм, раскладка пряжи осуществляется нитеводителем, приводимым, как правило, пазовым кулачком. Наибольшее распространение получили утоняющие устройства с использованием дискретизирующего валика.

Двухконденсерный (фрикционный) способ прядения относится к безверетенному пневмомеханическому, реализованному на серийной машине ППМ-120. Общим является то, что волокнистая лента из таза подается к дискретизирующему валику, который разделяет волокна и подает их в виде волокнисто-воздушной смеси в зону прядения. Отличие состоит в реализации зоны прядения: у серийной машины – это камера (ротор) с высокой частотой вращения, у разрабатываемой – два конденсера с однонаправленным вращением [3]. Двухконденсерный способ прядения потенциально обладает более высокой производительностью по сравнению с пневмомеханическим камерным способом, кроме того, менее требователен и универсален по отношению к исходному сырью [1, 2].

При разработке машины целесообразно использовать освоенный или, по крайней мере, разработанный ранее прототип. Поэтому нами произведен анализ возможных вариантов компоновки средних секций машин ППМ-120А1М (шаг прядильных мест у серийной машины – 120 мм и 160 мм у машины с измененной компоновкой средней секции) и ППМ-200 (шаг прядильных мест 200 мм).

Кроме вышеизложенного, при выборе базы учитывалось, что габарит по ширине фрикционного прядильного устройства, как показали конструктивные проработки, должен быть не менее 160 мм. Это ограничение не позволяет использование собственно машины ППМ-120А1М даже с увеличением шага до 160 мм, так как это решение не позволяет получить паковку шириной 150 мм.

Анализ возможных вариантов схем расположения прядильных мест и тазов на базе машин ППМ-120А1М и ППМ-200 привел к выводу, что шаги 160, 200, 240 мм на базе секции машины ППМ-120А1М и шаг 240 мм на базе секции машины ППМ-200 неприемлемы. Сформулированным требованиям в полной мере отвечает вариант 5 таблицы 1, то есть машина ППМ-200 с шагом 200 мм.

Во всех проработанных вариантах диаметр паковки пряжи равнялся 250 мм, что диктуется реальной конструктивной базой машин и их технической характеристикой.

Вопрос промышленного производства разрабатываемой машины может решиться положительно только после расчета эффективности использования новой машины, когда будет подтверждено превышение эффективности в сравнении с используемыми прототипами.

Многофакторный сравнительный расчет включает, в том числе, суммарную потребляемую мощность, скорость выпуска пряжи, число обрывов на 1000 рабочих мест в час, время на ликвидацию обрыва, площадь, занимаемую машиной. Последний из указанных факторов всегда учитывается в технико-экономических расчетах. Задача разработчика – уменьшить площадь, занимае-

## ГЕОМЕТРИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТАЗОВ...

мую техникой. Специфика прядильного цеха состоит в том, что увеличение площади ведет к увеличению времени прохода обслуживающим персоналом машин для ликвидации обрыва пряжи, следовательно, к уменьшению числа обслуживаемых прядильных мест одним человеком. Таким образом, вопрос уменьшения площади, занимаемой машиной, тем более актуален для прядильного производства.

При прорисовке геометрии расположения тазов учитывалась возможность смещения осей основания цилиндров, что в той или иной мере позволяет уменьшить габарит секции по ширине.

Если для вариантов 1 и 2 (табл. 1) такое смещение ничтожно мало влияет на ширину секции, то для остальных вариантов должно быть учтено. Далее будет показано, как влияет смещение тазов на занимаемую площадь на примере обоснованного варианта 5 (табл. 1).

Таблица 1 – Варианты схем расположения прядильных мест на базе средних секций машин ППМ-120А1М и ППМ-200

| Схема                                                                                                                                                                                | Характеристики варианта                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                                                    | 2                                                                                                                                                                   |
| <p>Схема 1: 8 тазов в ряду, диаметр <math>\phi 220</math>. Габариты: ширина 1000 мм, длина 2010 мм, отступ от края 105 мм.</p>                                                       | <p>Вариант 1</p> <p>Шаг 120 мм<br/>Число мест в секции 32<br/>Ширина паковки – не более 90 мм<br/>Ширина прядильного блока 120 мм<br/>База машины ППМ-120А1М</p>    |
| <p>Схема 2: 6 тазов в ряду, диаметр <math>\phi 300</math>. Габариты: ширина 1200 мм, длина 2010 мм, отступ от края 125 мм, расчетная длина <math>11 \times 160 = 1760</math> мм.</p> | <p>Вариант 2</p> <p>Шаг 160 мм<br/>Число мест в секции 24<br/>Ширина паковки 115-120 мм<br/>Ширина прядильного блока не более 160 мм<br/>База машины ППМ-120А1М</p> |
| <p>Схема 3: 5 тазов в ряду, диаметр <math>\phi 350</math>. Габариты: ширина 1410 мм, длина 2010 мм, отступ от края 105 мм, расчетная длина <math>9 \times 200 = 1800</math> мм.</p>  | <p>Вариант 3</p> <p>Шаг 200 мм<br/>Число мест в секции 20<br/>Ширина паковки не более 90 мм<br/>Ширина прядильного блока 120 мм<br/>База машины ППМ-120А1М</p>      |

Окончание табл. 1

| 1                                                                                                                                                          | 2                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p> <math>\phi 400</math> (4 тазов в ряду)<br/> <math>7 \times 240 = 1680</math><br/> <math>2100</math><br/> <math>1000</math><br/> <math>1500</math> </p> | <p>Вариант 4</p> <p>Шаг 240 мм<br/> Число мест в секции 16<br/> Ширина паковки 150 мм<br/> Ширина прядильного блока 240 мм<br/> База машины ППМ-200</p>          |
| <p> <math>\phi 350</math> (5 тазов в ряду)<br/> <math>9 \times 200 = 1800</math><br/> <math>2100</math><br/> <math>1000</math><br/> <math>1360</math> </p> | <p>Вариант 5</p> <p>Шаг 200 мм<br/> Число мест в секции 20<br/> Ширина паковки 150 мм<br/> Ширина прядильного блока не более 200 мм<br/> База машины ППМ-200</p> |

Несмотря на возможность производства машин с разным количеством секций, целесообразно в последующих расчетах сравнительной эффективности принять количество секций, равное семи, как наиболее распространенный вариант исполнения.

При прорисовке геометрии расположения цилиндрических тазов использовалась лицензионная копия автоматизированной системы КОМПАС – 3D V13, являющаяся собственностью Пензенского государственного технологического университета.

В табл. 2 представлены схемы расположения тазов и площадь, занимаемая семью средними секциями машины.

Таблица 2

| Схемы расположения тазов                                                                                             |                                                                                                                      |                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Без смещения, площадь (из расчета семи секций) 21,5 м <sup>2</sup>                                                   | Зеркальное смещение относительно продольной оси машины, площадь 20 м <sup>2</sup>                                    | Смещение с копированием рядов относительно продольной оси машины, площадь 19,4 м <sup>2</sup>                        |
| <p> <math>\phi 350</math> (5 тазов в ряду)<br/> <math>2100</math><br/> <math>1000</math><br/> <math>1460</math> </p> | <p> <math>\phi 350</math> (5 тазов в ряду)<br/> <math>2100</math><br/> <math>1000</math><br/> <math>1360</math> </p> | <p> <math>\phi 350</math> (5 тазов в ряду)<br/> <math>2100</math><br/> <math>1000</math><br/> <math>1320</math> </p> |

Из представленных схем и расчетов следует, что благодаря смещению, выполненному с копированием рядов относительно продольной оси машины, возможно уменьшить площадь, занимаемую средними секциями машины до 19,4 м<sup>2</sup>, уменьшив ее на 2,1 м<sup>2</sup>.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Волков В.В., Привалов И.И., Иванов А.В., Юдина Е.Ю. Влияние основных факторов на свойства пряжи двухконденсерного (фрикционного) способа прядения // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2011. – № 6. – С. 33–37.
2. Севостьянов А.Г., Привалов И.И. Оптимизация скоростных режимов при формировании армированной пряжи двухконденсерным (фрикционным) способом прядения // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 1995. – № 6. – С. 19–22.
3. Устройство для получения пряжи / Волков В.В., Привалов И.И., Привалов И.С., Иванов А.В. – Патент на изобретение RU 2161665. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений 22 сентября 1999 г.

---

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ

---

УДК 519.8

## ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ КАК ОСНОВНАЯ ПРОЦЕДУРА В ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ КОМПЬЮТЕРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© *Д.И. Прошин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

## GENERALIZATION AS THE BASIC PROCEDURE IN INTEGRATED DESIGN OF COMPLEX COMPUTER-SIMULATION

© *D.I. Proshin, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассматривается подход к построению интегрированных комплексов математического и компьютерно-имитационного моделирования, основанный на генерализации образовательного процесса по вектору знаний. Проведён выбор основных генеральных совокупностей.

**Ключевые слова:** автоматизация научных исследований, генерализация, генеральная совокупность, лаборатория, модель, образовательный процесс.

The paper discusses an approach to the construction of an integrated set of mathematical and computer simulation based on a generalization of the educational process to the vector of knowledge. Conducted selection of major general populations.

**Key words:** automation of scientific research, generalization, general population, a laboratory, a model educational process.

**E-mail:** proshinDI@mail.ru

Постоянное научно-техническое совершенствование современного мира приводит к необходимости периодически пересматривать уже сложившиеся в нашем создании представления о, как нам казалось, уже устоявшихся вещах. Для образовательных систем это особенно актуально, поскольку именно от них зависит скорость и эффективность этого совершенствования. К примеру, разрыв между актуальным уровнем научно-технического развития и уровнем математического, технического и программного обеспечения доступных при подготовке специалистов в разы снижает эффективность такой подготовки.

Одним из основных способов сокращения этого разрыва является построение лабораторных комплексов технического и компьютерно-имитационного моделирования в образовательных системах. На сегодняшний день вопрос о необходимости и актуальности построения таких комплексов ни кем не ставится под сомнение. Создаются тысячи различных лабораторных комплексов, включающих в себя дорогостоящее оборудование, математическое и программное обеспечение. Каждый из комплексов направлен на свой узкий круг решаемых исследовательских задач. Но, как оказывается на практике, этот подход также редко бывает эффективным. Причиной тому служат дороговизна и сильная функциональная ограниченность таких комплексов. При выборе номенклатуры лабораторных установок отсутствует системный подход. Всё это приводит к крайне низкой эффективности их работы и как следствие к ещё большему отставанию от современной научно-технической базы.



Решить проблему повышения эффективности функционирования лабораторных комплексов технического и компьютерно-имитационного моделирования можно, если в основу их проектирования положить системный подход и процедуры генерализации.

Под генерализацией будем подразумевать последовательность шагов: поиска генеральных совокупностей, обобщения в контексте этих совокупностей и элиминации – устранения несогласованности и лишних элементов в обобщении.

Генерализация как инструмент структурной и параметрической оптимизации системы позволяет сосредоточиться при проектировании системы на наиболее важных её аспектах, максимально увеличить число вариантов использования системы в дальнейшем.

Поскольку основной целью существования всех лабораторных комплексов технического и компьютерно-имитационного моделирования в образовании является повышение эффективности процесса обучения, то и выбираемые совокупности должны быть неотъемлемо подчинены образовательному процессу.

Основные виды генеральных совокупностей, которые предлагается использовать при проектировании комплексов технического и компьютерно-имитационного моделирования, приведены на рис. 1.

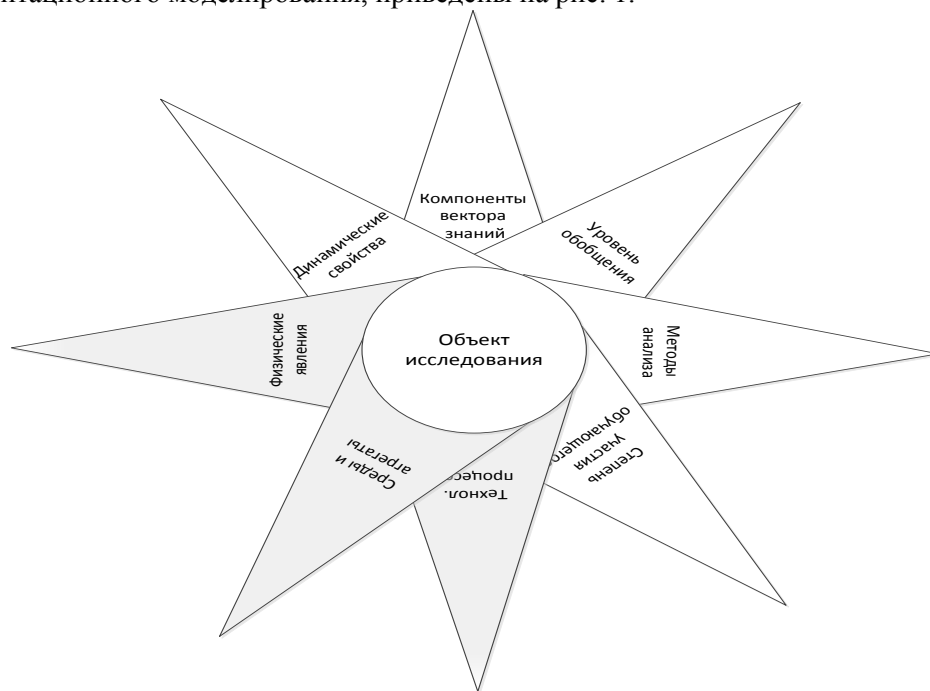


Рисунок 1 – Генеральные совокупности, используемые при проектировании интегрированного комплекса компьютерно-имитационного моделирования

Весь состав программного, технического, математического обеспечения, а также варианты их использования должны определяться посредством рассмотрения объекта исследования в контексте этих генеральных совокупностей.

**Вектор знаний.** За основу интеграции методического, математического и программного обеспечения комплексов компьютерно-имитационного моделирования в образовательных системах предлагается принять единое векторное пространство, отражающее генеральную совокупность признаков, позволяющее осуществлять эффективную непрерывную концепцию обучения [1–4].

Так, например, обобщение требований к профессиональной подготовке выпускника по направлению “Автоматизация технологических процессов

и производств” позволяет выделить в качестве базовых следующие компоненты (рис. 2):

- 1) математическо-методологический ( $v_1$ ),
- 2) информационно-программно-алгоритмический ( $v_2$ ),
- 3) технико-технологический ( $v_3$ ),
- 4) организационно-экономический ( $v_4$ ),
- 5) культурно-воспитательный ( $v_5$ ).

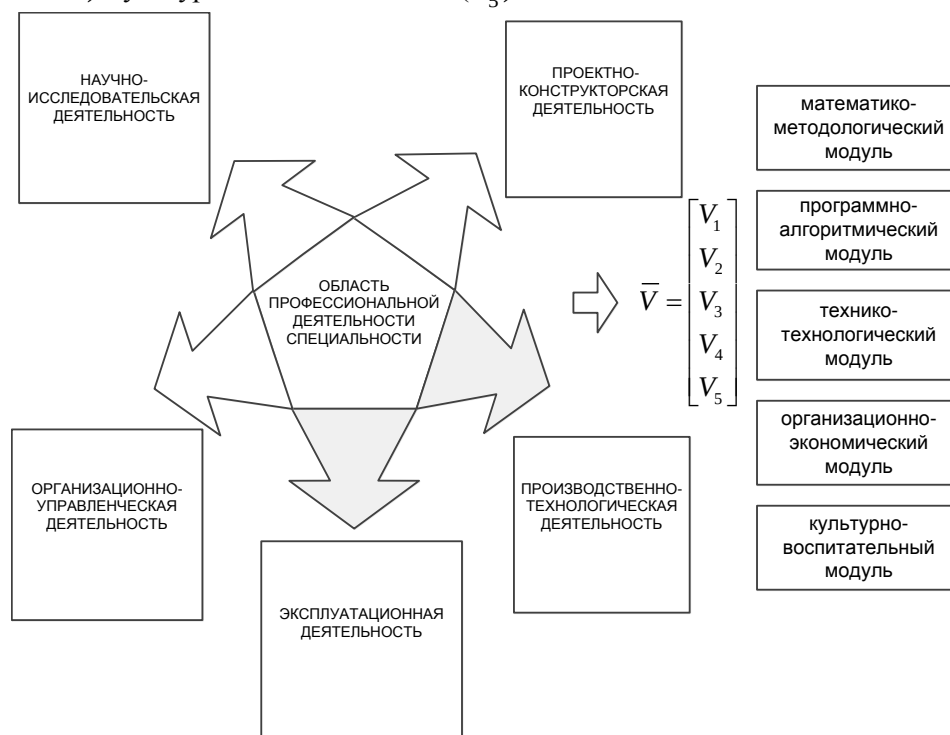


Рисунок 2 – Структура формирования вектора знаний

**Степень участия обучающегося** в системе математического и компьютерно-имитационного моделирования зададим с помощью вектора управляющих воздействий  $\bar{U}^0$ :

- управление мотивацией  $\bar{U}_4^0$ ,
- управление критериями оценки знаний  $\bar{U}_3^0$ ,
- управление целями и задачами  $\bar{U}_2^0$ ,
- управление методологией познавательной деятельности  $\bar{U}_1^0$ ,
- управление предметно-содержательной компонентой знаний  $\bar{U}_0^0$ , и представим обучающегося как многоуровневую (многослойную) систему управления [5, 6].

Математическое моделирование в образовательном процессе представляет собой сложный механизм интеллектуального взаимодействия преподавателя и обучающегося, в результате которого формируется управление и происходит совершенствование как обучающегося, так и преподавателя. Степень участия в процессе управления познавательной деятельностью преподавателя и

обучающегося в относительных единицах может быть задана относительным коэффициентом, изменяющимся в диапазоне от 0 до 1.

С учётом выделенных крайних уровней управления и организации управления познавательной деятельностью можно выделить 243 модели процесса обучения (рис. 3).

М[00000] – управление обучением по всем уровням управления полностью сконцентрировано у преподавателя, обучаемый полностью управляется и контролируется преподавателем;

М[10000] – управление обучением предметным знаниям распределено между преподавателем и обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

М[20000] – управление обучением предметным знаниям полностью реализуется обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

М[01000] – управление методами и методиками познавательной деятельности распределено между преподавателем и обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

М[02000] – управление методами и методиками познавательной деятельности реализуется обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

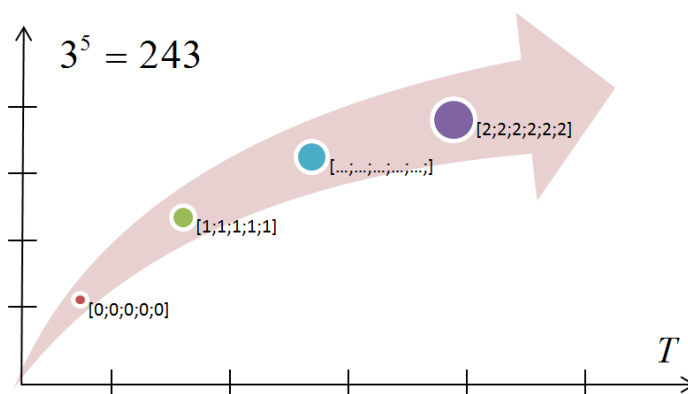
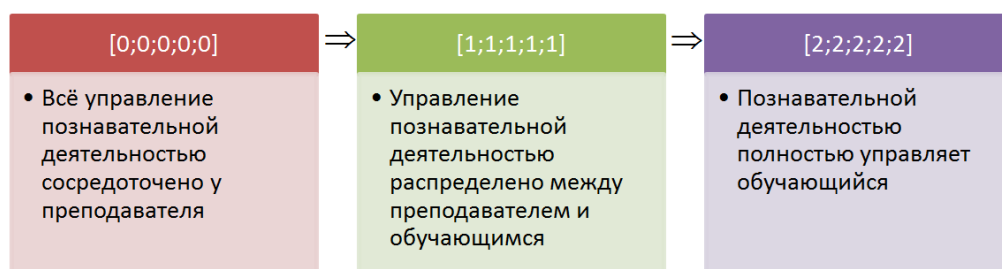


Рисунок 3 – Модели методов обучения

М[00100] – управление критериями оценки знаний распределено между преподавателем и обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

М[00200] – управление критериями оценки знаний реализуется обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

М[00010] – управление целями и задачами распределено между преподавателем и обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

М[00020] – управление целями и задачами реализуется обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

М[00001] – управление мотивацией распределено между преподавателем и обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя;

М[00002] – управление мотивацией реализуется обучающимся, управление познавательной деятельностью на остальных уровнях управления сконцентрировано у преподавателя.

**Уровень обобщения.** Образовательный процесс объединяет множество дисциплин, методик, моделей обучения и распределен как во времени, так и в пространстве.

Предлагается интегрированные комплексы компьютерно-имитационного моделирования структурировать по компонентам вектора знаний и по уровню подготовки и степени детализации, обобщения, специализации (рис. 4) [1, 2].

|                             | V <sub>3</sub>                 | V <sub>2</sub>                                     | V <sub>1</sub>                     | V <sub>4</sub>                    | V <sub>5</sub>               |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 5                           | «Специализация»                |                                                    |                                    |                                   |                              |
| 4                           | «От обобщения к специализации» |                                                    |                                    |                                   |                              |
| 3                           | «Обобщение»                    |                                                    |                                    |                                   |                              |
| 2                           | «От детализации к обобщению»   |                                                    |                                    |                                   |                              |
| 1                           | «Детализация»                  |                                                    |                                    |                                   |                              |
| Курс<br>Модуль<br>дисциплин | Технико -<br>технологический   | Информационно -<br>программно -<br>алгоритмический | Математическо-<br>методологический | Организационно -<br>экономический | Культурно-<br>воспитательный |

Рисунок 4 – Уровни обобщения

**Методы анализа** в интегрированном комплексе представляют собой единую методологию системной организации математического и физического моделирования [7] и опираются на системный, энергетический и информационно-алгоритмический причинно-следственный подходы, комплексное изучение объекта исследований (ОИ), сочетающее экспериментальные и теоретические исследования, моделирование, технологические и конструктивные проработки, схмотехнические решения с выявлением главных, определяющих функций ОИ и его составных частей в достижении цели (рис. 5).



Рисунок 5 – Системная организация математического моделирования

Исследования **динамических свойств** объектов (механических, гидродинамических, тепловых и т.д.) строятся на математических моделях Вход-Выход и на моделях в пространстве состояний [8, 9].

Исследования технологических процессов на основе энергетического подхода включают в себя анализ **физических явлений**, на которых основывается принцип действия различных технических установок и механизмов [10].

Математическое моделирование технических систем основывается на декомпозиции их по агрегатам, средам по видам математических моделей.

Таким образом, разработана методология построения интегрированных комплексов математического и компьютерно-имитационного моделирования, основной процедурой которой является генерализация образовательного процесса по вектору знаний, обеспечивающая целостность математического моделирования технических объектов в образовательном процессе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин Д.И. Управление образовательным процессом по вектору знаний : Монография. – Пенза : ПГТА, 2012. – 454 с.
2. Прошин Д.И. Методология построения интегрированной системы профессиональной подготовки : Коллективная монография. – Красноярск : Научно-инновационный центр, 2011. – Книга 2. – С. 235–260.
3. Прошин Д.И. Подготовка высококвалифицированных кадров для предприятий машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 1–3. – С. 727–731.
4. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д., Сюлин П.В. Управление образовательным процессом подготовки кадров для машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1(2). – С. 705–708.
5. Прошин Д.И. Образовательная система как объект управления познавательной деятельностью (статья) // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 2. – С. 144–153.

6. Прошин Д.И. Концепция представления механизма познавательной деятельности как двустороннего процесса взаимодействия многослойных интеллектуальных систем (статья) // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 2. – С. 169–179.

7. Прошин Д.И. Принципы системной организации профессиональной подготовки в вузе (статья) / Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Педагогическое образование и наука. – 2009. – № 10. – С. 76–79.

8. Прошина Р.Д. Математическое моделирование технических систем в нормальной форме пространства состояний // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 1(3). – С. 613–616.

9. Прошина Р.Д. Математическое моделирование систем управления в нормальной форме пространства состояний // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 197–202.

10. Математическое моделирование и обработка информации в исследованиях на ЭВМ / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Н.Н. Мишина, А.И. Прошин, В.В. Усманов; Под ред. И.А. Прошина. – Пенза : ПТИ, 2000. – 422 с.

УДК 004.054+621.771.074

#### **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАЛИБРОВОЧНО-ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ВИБРОСТЕНДА**

© А.А. Абакумов, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)

© Т.В. Астахова, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)

© А.Д. Семёнов, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)

#### **AN ESTIMATION OF PARAMETERS OF MATHEMATICAL MODEL OF GAUGE-PROOF-OF-CONCEPT VIBROSTAND**

© A.A. Abakumov, Penza State University (Penza, Russia)

© T.V. Astachova, Penza State University (Penza, Russia)

© A.D. Semenov, Penza State University (Penza, Russia)

Разработана математическая модель вибростенда. Проверена процедура идентификации с использованием ППП Graph2 и MatLab.

**Ключевые слова:** калибровочно-испытательный вибростенд, объект исследования, датчик вибрации, система управления, математическая модель вибростенда, матрица управления.

The mathematical model of vibrostand is worked out. Procedure of authentication is tested with the use of PAP Graph2 and MatLab.

**Key words:** gauge-proof-of-concept vibrostand, research object, sensor of vibration, control system, mathematical model of vibrostand, management matrix.

Значительное количество отказов аппаратуры, установленной на подвижных объектах, вызывается воздействием интенсивных механических вибраций. Кроме того, вопросы прочности и надежности при воздействии вибраций давно приобрели решающее значение при разработке и конструировании машин. Однако количественное определение возникающих при воздействии вибрации зависимостей при испытаниях приборов и аппаратов значительно слож-

нее, чем при рассмотрении аналогичных вопросов в машиностроении. Приборы и аппараты, как правило, содержат большое число различных конструктивных элементов и узлов, реакция которых на воздействие вибраций различна.

Отсюда вытекает задача проведения виброиспытаний датчиков ракетно-космической техники на стадии их разработки.

Для этих целей широко используются различные вибрационные электродинамические стенды.

В состав любого испытательного стенда для проведения вибрационных испытаний входят (рис. 1): вибростенд с усилителем мощности и системой охлаждения, испытуемое изделие, датчик вибрации, система управления.

Помимо этого, в состав вибростенда в традиционном исполнении может входить большое количество различных приборов, которые komponуются из отдельных устройств и приборов различных фирм (генераторы синусоидальных сигналов, шумовых сигналов, ударных импульсов, сигналов специальной формы, вольтметры широкополосный и частотноизбирательный, измеритель нелинейных искажений, частотомер, первичные датчики и соответствующие преусилители и т.д.).

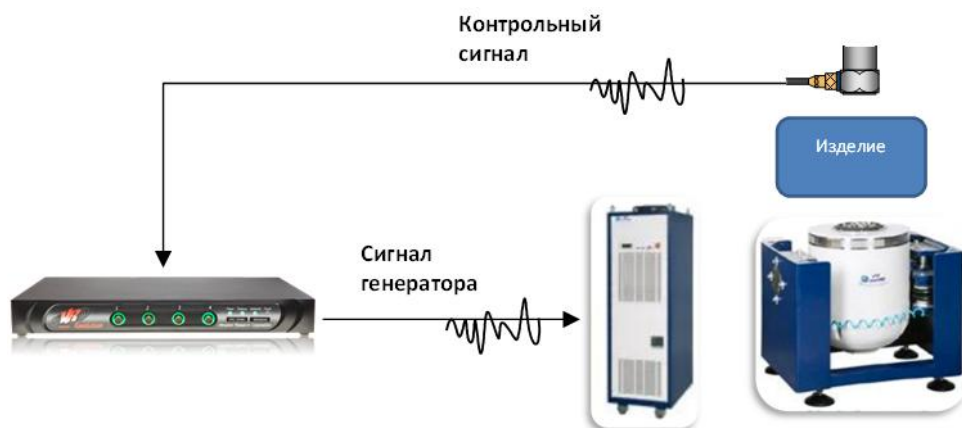


Рисунок 1 – Функциональная схема виброэлектродинамического стенда

Структурная схема измерительной системы управления вибростендом приведена на рис. 2.

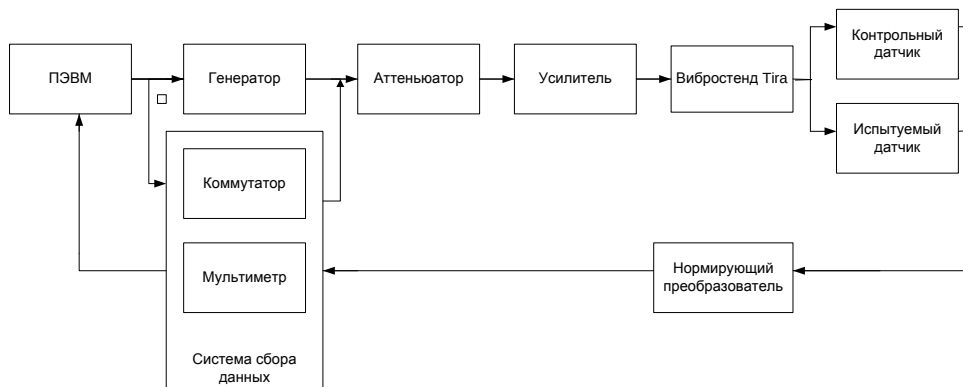
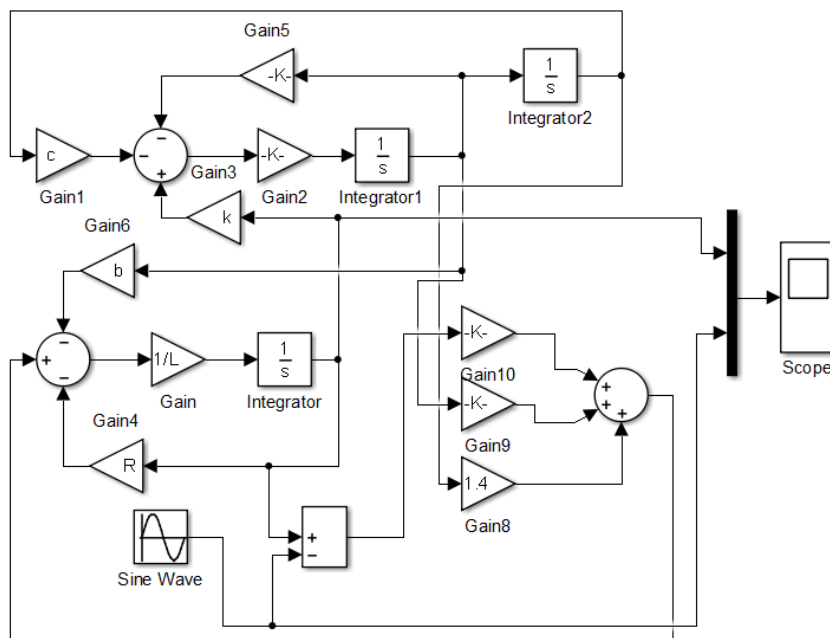


Рисунок 2 – Структурная схема измерительной системы управления вибростендом

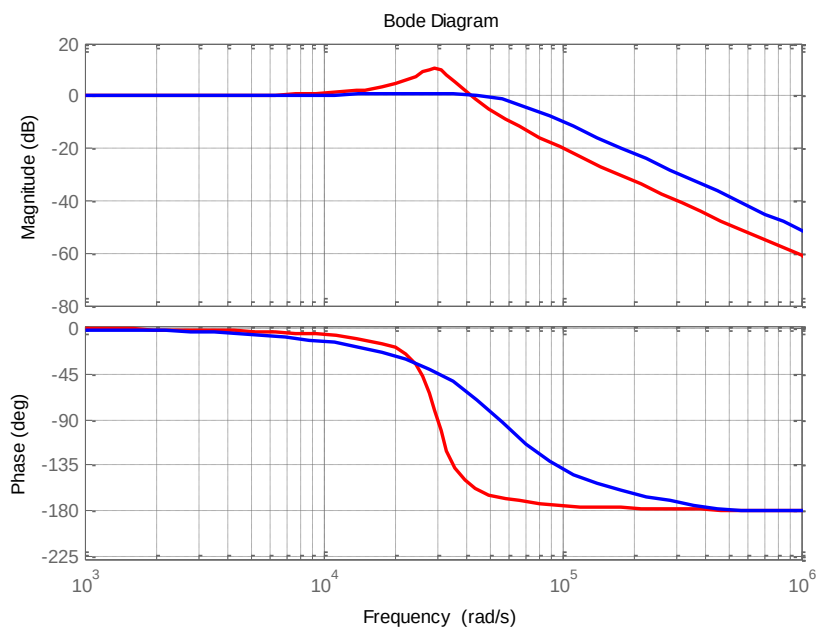




В результате проведения синтеза методом аналитического конструирования регуляторов была найдена матрица управления  $C$ . На рис. 4 представлена схема вибростенда совместно с синтезированным ЛКГ-регулятором.



В результате проделанной работы был расширен частотный диапазон до 8000 Гц, это видно на рис. 5 где представлена ЛАХ системы до синтеза АКОР и после.



61

Также была улучшена точность воспроизведения сигналов на низких частотах.

**Выводы**

1. Предложена математическая модель вибростенда типа TV5200.
2. Апробирована процедура идентификации с использованием программных продуктов Graph2 и MATLAB.
3. Проведена проверка точности идентификации по предложенной процедуре, показавшая хорошее совпадение параметров тестового объекта с параметрами, полученными в результате идентификации.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 744 с.*
2. *Изерман Р. Цифровые системы управления. – М. : Мир, 1984. – 541 с.*
3. *Растрегин Л.А. Системы экстремального управления. – М. : Наука, 1974. – 323 с.*

**УДК 004.4**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА СЕТЕВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛАБОРАТОРИЙ**

© **Р.Д. Прошина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **Е.С. Прошина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **В.В. Волков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**THE SOFTWARE INTEGRATED COMPLEX NETWORK AUTOMATED LABORATORY**

© **R.D. Proshina**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **E.A. Proshina**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **V.V. Volkov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Рассматривается математическое обеспечение интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий. Приведена единая система математических моделей "Вход – выход" и "Вход – состояние – выход", составляющая основу математико-методологической подготовки по направлению "Автоматизация и управление".

**Ключевые слова:** Автоматизация научных исследований, интегрированный комплекс, лаборатория, математическая модель, профессиональная подготовка, управление.

We consider a mathematical solution to a complex network of integrated automated-governmental laboratories. Presented a unified system of mathematical models of the "Sign - Exit Entrance - state - output", is the basis of mathematical and methodological training in the direction of "Automation and Control".

**Key words:** Automation of scientific research, an integrated complex, laboratory-parameter mathematical model, training, management.

**E-mail:** proshin.Ivan@inbox.ru

Интегрированный комплекс сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) в соответствии с предлагаемой концепцией представляет собой совокупность методического, математического, информационно-алгоритмического

обеспечения, аппаратных и программных средств [1–3]. Данная работа направлена на создание единой системы математических моделей, обеспечивающих проведение научных исследований и профессиональной подготовки по всем дисциплинам специальности или комплекса специальностей в векторном пространстве знаний [4–7].

Основное требование, определяющее методологию специальностей по направлению “Автоматизация и управление”, состоит в обеспечении проектирования автоматизированных систем управления, ключевым для которого является последовательность процедур “Модель – анализ – синтез” (рис. 1).

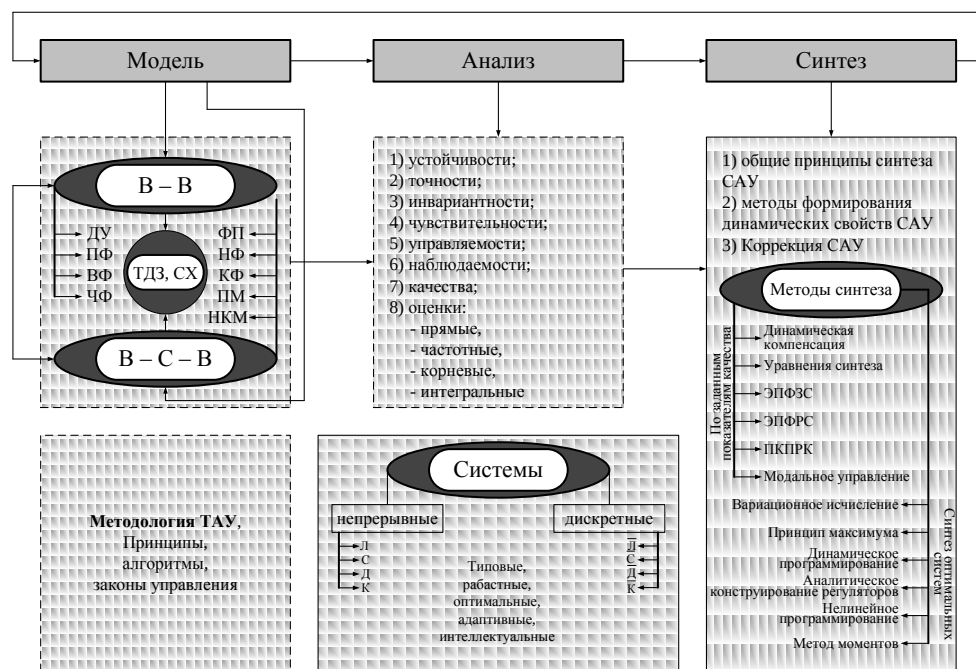


Рисунок 1 – Тематическая структура математико-методологической компоненты вектора знаний

За основу математических моделей (ММ) для рассматриваемого направления примем структурирование моделей по классам. В качестве узловых, как при обучении на всех ступенях профессиональной подготовки по вектору знаний, так и при проведении научных исследований, введём математические модели “Вход – выход” и “Вход – состояние – выход”, систематизированные на базе принятых в теории управления принципов [8, 9].

Методологическая основа рассматриваемого направления – фундаментальные принципы управления, алгоритмы функционирования, законы управления. Ядро технологических процессов большинства специальностей – основные физические законы механики, гидростатики, гидродинамики, теплотехники, электромагнетизма и др. Поэтому важной составляющей моделирования объектов управления является построение ММ моделей на основе энергетического подхода с использованием законов физики [10–12].

Методология анализа систем управления основывается на анализе устойчивости, управляемости, наблюдаемости, чувствительности, инвариантности, точности в установившихся режимах, качества, включая прямые, частотные, корневые и интегральные оценки качества. Изучение основ синтеза систем управления, прежде всего, включает в себя освоение всех этапов проектирования САУ, охватывая общие принципы топологического, структурного и пара-

метрического синтеза, методы формирования динамических свойств САУ, коррекцию САУ введением местных обратных связей, и обратных связей по производным. Базовыми являются две группы методов. Методы синтеза по заданным показателям качества и методы оптимального синтеза систем с использованием оптимизационных процедур.

На различных этапах анализа и синтеза систем автоматического управления требуется использование как ММ «Вход – выход», так и моделей «Вход – состояние – выход». Поэтому возникает необходимость взаимного преобразования ММ разнообразных форм.

Множество и специфика решаемых при анализе и синтезе систем автоматического управления (САУ) задач часто приводят к противоречивым требованиям к математическим моделям, применяемым при исследовании САУ, что вызывает необходимость использования различных форм их представления.

В результате систематизации ММ в виде передаточных функций выделим пять форм (рис. 2): полиномиальную (ПФ), каноническую (КФ), факторизованную (ФФ), стандартную (СФ), стандартно-факторизованную (СФФ).

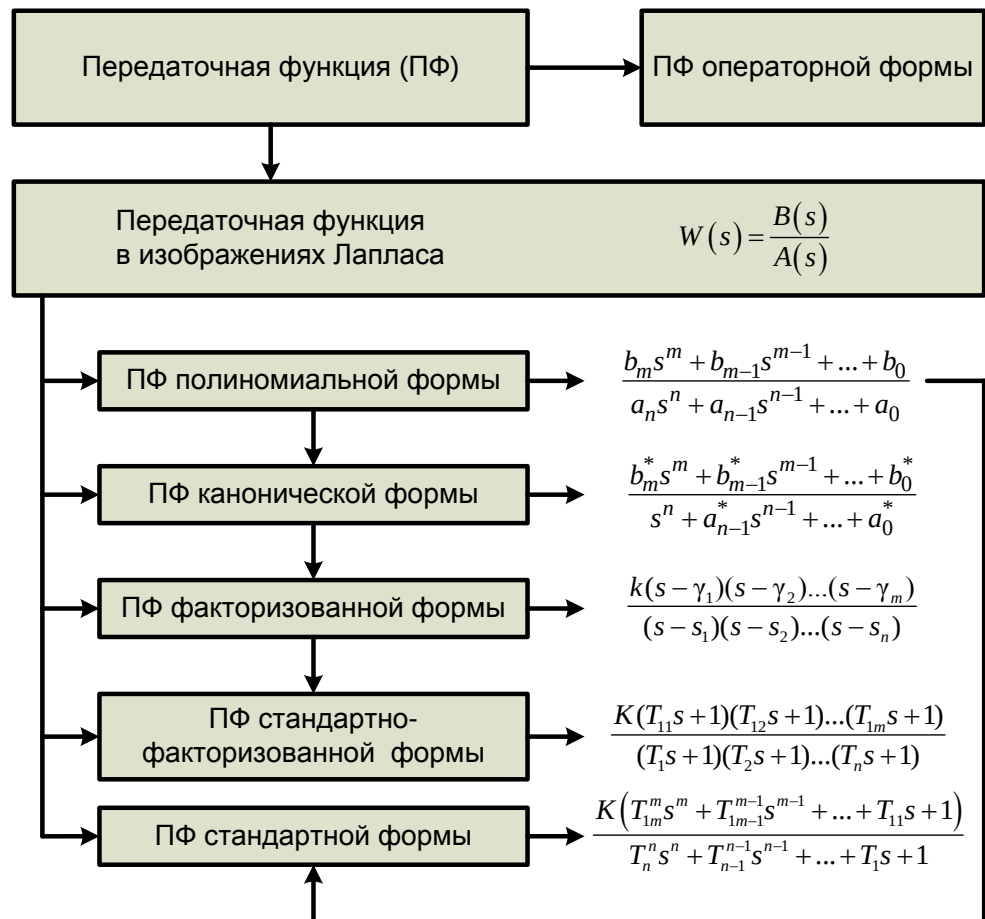


Рисунок 2 – Систематизация передаточных функций

Математические модели “Вход – выход” в классе дифференциальных уравнений представлены в общем, каноническом и стандартном виде. Каждый вид в свою очередь может быть задан в трёх формах: дифференциальной, неявной и явной операторной.

Предлагается следующая систематизация математических моделей «Вход – выход» в классе НЛСДК операторов, заданных дифференциальными уравнениями (рис. 3).

Поскольку входные и выходные переменные в моделях систем определены, то переход к ММ «Вход – выход» однозначен. Вместе с тем выбор переменных состояния в моделях пространства состояний не единственен. Поэтому если в ММ «Вход – выход» принцип причинности строго выполняется, то модели в форме пространства состояний не всегда удовлетворяют этому принципу, что нарушает целостность методологии исследования управляемых систем.



Рисунок 3 – Систематизация моделей в виде дифференциальных уравнений

Суть предлагаемого метода математического описания системы  $n$ -го порядка

$$\sum_{v=0}^n a_v x^{(v)}(t) = \sum_{\mu=0}^m b_{\mu} y^{(\mu)}(t)$$

с выходной  $x$  и входной  $y$  координатами, коэффициентами характеристического полинома  $a_v$  и оператора входного воздействия  $b_{\mu}$  в нормальной форме пространства состояний с прямой причинно-следственной связью, состоит в том, что переменные состояния  $v_v$  в ММ пространства состояний

$$\begin{aligned} \bar{V}^{(1)}(t) &= A\bar{V}(t) + By(t); \\ x(t) &= C\bar{V}(t) + dy(t) \end{aligned}$$

вводят, начиная с  $n$ -й фазовой переменной в соответствии с выражением

$$v_v(t) = \begin{cases} x^{(n-v)}(t), & v \in (m, n]; \\ x^{(n-v)}(t) - \sum_{i=0}^{m-v} \lambda_{v+i} y^i(t), & v \in (0, m]; \\ x^{(n)}(t) + \lambda_0 y(t), & v = 0, \end{cases}$$

значения коэффициентов  $\lambda_i$  вычисляют по рекуррентным формулам:

$$\lambda_i = \begin{cases} b_i, & i = m; \\ b_i - \sum_{j=i+1}^m \lambda_j a_{n+i-j}, & i = \overline{m-1, 0}, \end{cases}$$

а матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и коэффициент  $d$  задают в виде

$$A = \begin{bmatrix} -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_2 & -a_1 & -a_0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \\ \dots \\ \lambda_{m-1} \\ \lambda_m \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$C = [0 \ 0 \ \dots \ 1]; \quad d = \begin{cases} \lambda_m, & \text{при } m=n; \\ 0, & \text{при } m < n. \end{cases}$$

Отличительная особенность разработанного метода математического описания системы  $n$ -го порядка в канонической форме пространства состояний с прямой причинно-следственной связью состоит в том, что в матрице Жордана для систем управления, передаточные функции которых

$$W(s) = \frac{B(s)}{\prod_{i=1}^r (s-s_i)^{\mu_i}} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{\mu_i} \frac{C_{ij}}{(s-s_i)^j}$$

содержат  $r$  кратных полюсов  $s_i$  кратности  $\mu_i$  ( $\sum_{i=1}^r \mu_i = n$ ), элементу, предшествующему в строках клеток Жордана диагональному, задают значение, равное 1,

остальным – равное 0, а значения коэффициентов матрицы

$$C = [C_{11}, C_{12}, \dots, C_{1\mu_1}, \dots, C_{r\mu_r}]$$

вычисляют по формуле

$$C_{ij} = \frac{1}{(\mu_i - j)!} \frac{d^{\mu_i - j}}{ds^{\mu_i - j}} \left[ (s-s_i)^{\mu_i} W(s) \right] \Big|_{s=s_i}.$$

Динамические объекты часто представляют собой значительное количество разнородных элементов, эффективность математического описания кото-

рых с использованием одних и тех же форм неодинакова. В связи с этим предлагаются комбинированные способы математического описания систем в пространстве состояний с прямой причинно-следственной связью, систематизация которых на базе трёх основных методов приведена на рисунке 4.

Разработанное и систематизированное семейство методов математического описания удовлетворяет базовым принципам теории управления и системного анализа и составляет единую методологическую основу для исследования систем управления с использованием математических моделей “Вход – выход” и в форме пространства состояний с прямой причинно-следственной связью.

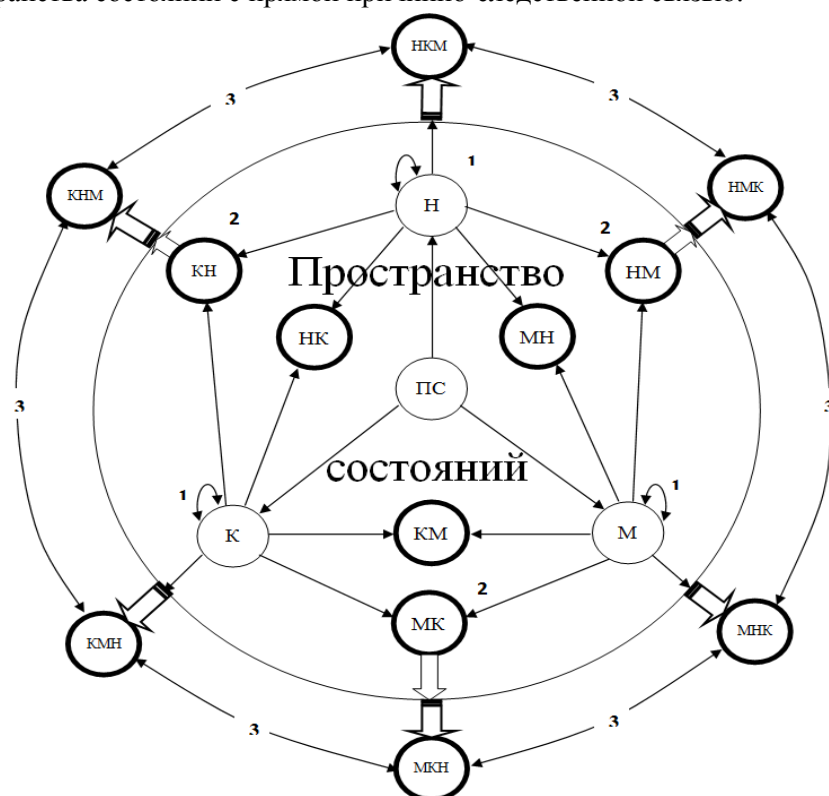


Рисунок 4 – Систематизация математических моделей динамических систем в комбинированных формах пространства состояний:  
Н – нормальная; К – каноническая; М – простых множителей

Математическое обеспечение интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий по направлению “Автоматизация технологических процессов и производств” объединяет весь комплекс дисциплин специальности на всех этапах и уровнях обучения в единую интегрированную систему научных исследований и профессиональной подготовки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Концепция построения интегрированных комплексов сетевых автоматизированных лабораторий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 5(2). – С. 527–530.
2. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Программная платформа для построения интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т.11. – № 5–2. – С. 531–536.

3. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Интегрированный электро-механический комплекс // В мире научных открытий. – 2010. – № 4–8. – С. 27–30.
4. Прошин Д.И. Подготовка высококвалифицированных кадров для предприятий машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. № 1–3. – С. 727–731.
5. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д., Сюлин П.В. Управление образовательным процессом подготовки кадров для машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. № 1(2). – С. 705–708.
6. Прошин Д.И. Управление образовательным процессом по вектору знаний : Монография. – Пенза : ПГТА, 2012. – 454 с.
7. Прошин Д.И. Методология построения интегрированной системы профессиональной подготовки : коллективная монография. – Красноярск : Научно-инновационный центр, 2011. – Книга 2. – С. 235–260.
8. Прошина Р.Д. Математическое моделирование технических систем в нормальной форме пространства состояний // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 1(3). – С. 613–616.
9. Прошина Р.Д. Математическое моделирование систем управления в нормальной форме пространства состояний // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 197–202.
10. Математическое моделирование и обработка информации в исследованиях на ЭВМ / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Н.Н. Мишина, [и др.]; Под ред. И.А. Прошина. – Пенза : ПТИ, 2000. – 422 с.
11. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Н.Н. Структурно-параметрический синтез математических моделей в задачах обработки экспериментально-статистической информации. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. акад. – 2007. – 178 с.
12. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Автоматизированная обработка информации в системах управления технологическими процессами : Монография. – Пенза : ПГТА, 2012. – 330 с.

УДК 517.958, 519.711.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ  
МАЛОГАБАРИТНОГО ОСТОВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ**

© **В.В. Волков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **В.С. Николаев**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **С.В. Волков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**MODELING OF THE COMPELLED FLUCTUATIONS OF THE SMALL-  
DIMENSIONED FRAME OF THE TECHNOLOGICAL MACHINE**

© **V.V. Volkov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **V.S. Nikolaev**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **S.V. Volkov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Определена модель малогабаритного остова технологической машины, форма колебаний остова получена в матричном виде с учетом собственных форм его колебаний и граничных условий, определены гармонические коэффициенты влияния.



**Ключевые слова:** моделирование, технологическая машина, деформации, координаты возмущающей силы, гармонический коэффициент, начальные условия, функции Крылова, коэффициенты влияния, собственные формы колебаний.

Determined model of the small-dimensioned frame of the technological machine, the form of the fluctuations of the frame is received in matrix type with provision for own forms of his(its) fluctuations and border conditions, are determined harmonic factors of the influence.

**Key words:** modeling, technological machine, deformation, coordinates outraging power, harmonic factor, initial conditions, functions Krylova, factors of the influence, own forms of the fluctuations.

**E-mail:** mycolo @ rambler.ru

Увеличение скоростного режима основных рабочих органов технологической машины вызывает необходимость повышения жесткости элементов ее остова – несущей конструкции. Оптимизация несущей конструкции осуществляется на стадии конструирования машины посредством физического моделирования. Здесь рассматривается характер вынужденных колебаний остова.

Проведем моделирование несущей конструкции дозирующей секции тестоделительной машины, выполненной в виде отдельного модуля, несущая часть которой представляет боковые стойки в виде прямоугольных пластин (рис. 1), укрепленных по контуру непрерывным ребром жесткости, заделанных у основания и свободных по всем другим направлениям. Поперечные связи в совокупности с одной из боковых стоек можно считать упругими опорами с коэффициентами жесткости, равными коэффициенту жесткости боковой стойки. Они передают колебания от источника возбуждения, возникающие на одной из пластин, другой пластине.

Из условий равновесия изотропной колеблющейся пластины деформации боковых стоек во времени описываются дифференциальным квазистатическим неоднородным уравнением

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \frac{gD}{h\gamma} \Delta^2 \xi = \frac{g}{h\gamma} q(z, x, t), \quad (1)$$

где  $\xi$  – деформации боковых стоек;  $h$  – толщина боковых стоек;  $\gamma$  – удельный вес материала боковых стоек;  $D = \frac{EJ}{b}$  – цилиндрическая жесткость;  $\Delta^2$  – бигармонический оператор Лапласа;  $b$  – расстояние между ребрами жесткости;  $q(z, x, t)$  – внешняя нагрузка.

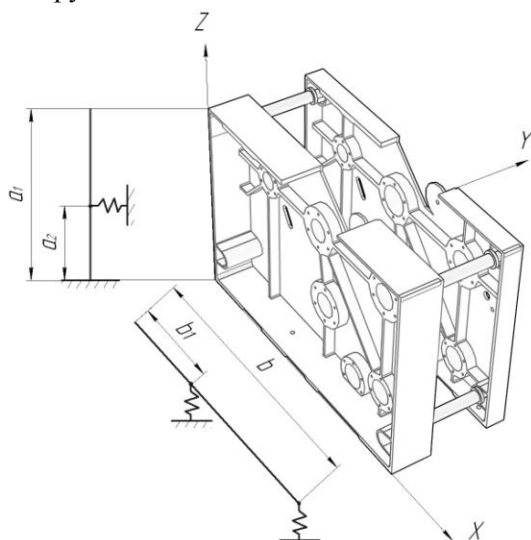


Рисунок 1

Уравнение (1) содержит три переменных: время  $t$ , координаты  $X$  и  $Z$ . Решение уравнения (1) относительно деформаций и нагрузки можно представить в виде рядов, описанных через собственные функции:

$$\xi = \sum_m T_m(t) W_m(x, z); \quad q(z, x, t) = \sum_m a_m(t) W \cdot(x, z), \quad (2)$$

где  $W_m(x, z)$  – гармонические коэффициенты влияния;  $a_m(t) = q_0 \cos \omega(t)$  – закон изменения нагрузки,  $\omega$  – вынужденная частота нагрузки.

Функция  $T_m(t)$  определяется из энергетического [1] баланса частоты собственных колебаний  $p_m$  боковых стоек – пластин

$$\frac{\partial^2 T_m}{\partial t^2} + p_m^2 T_m = \frac{g}{h\gamma} a_m(t). \quad (3)$$

Примем начальные условия:  $t=0$ ,  $T_m=0$  и  $\frac{dT_m}{dt}=0$ , тогда решение уравнения (3) будет иметь вид [2], [3]

$$T_m = \frac{q_0 g}{h\gamma(p_m^2 - \omega^2)} (\cos \omega t - \cos p_m t). \quad (4)$$

Учитывая координаты возмущающей силы  $q_0$  на боковой стойке, гармонический коэффициент  $W \cdot(x, z)$  и подставив (4) в уравнение (2), имеем

$$\xi = \sum_m \frac{q_0 g}{h\gamma(p_m^2 - \omega^2)} (\cos \omega t - \cos p_m t) W(z, x) W \cdot(z, x). \quad (5)$$

Из полученного следует, что задача сводится к определению  $W(x, z)$ .

По высоте оси  $Z$ , из условия на заделанном конце боковой стойки в виде балки с упругой опорой между концами (рис. 1), составим уравнения формы колебаний участков:

$$\text{для } 0 \leq z \leq a_2 \quad \varphi(z) = C u(kz) + D v(kz), \quad (6)$$

$$\text{для } a_2 \geq z \geq a_1$$

$$\varphi_1(z) = C u(kz) + D v(kz) + \frac{R}{k^3 \alpha' EJ} v[k(z - a_2)], \quad (7)$$

где  $u(kz) = 0.5(ch kz - \cos kz)$ ,  $v(kz) = 0.5(sh kz - \sin kz)$  – функции Крылова;  $k$  – комплексный параметр приведения уравнений вынужденных колебаний стержня к каноническому виду;  $C$  и  $D$  – произвольные постоянные;  $\alpha'$  – коэффициент снижения жесткости боковых стоек из-за влияния технологических отверстий;  $R$  – реакция промежуточной опоры.

Введя граничные условия по моменту и поперечной силе на свободном конце  $\varphi''(a_1) = \varphi'''(a_1) = 0$ , исключив произвольные постоянные  $C$  и  $D$ , получаем матричное выражение форм колебаний на участке  $0 \leq z \leq a_2$

$$\varphi(z) = \frac{R}{\Delta z k^3 \alpha' EJ} \begin{vmatrix} 0 & u(kz) & v(kz) \\ S[k(a_1 - a_2)] & v(ka_1) & S(ka_1) \\ T[k(a_1 - a_2)] & S(ka_1) & T(ka_1) \end{vmatrix} \quad (8)$$

где функции Крылова –  $S(ka_1) = 0.5(ch\,ka_1 - \cos ka_1)$  и  $T(ka_1) = 0.5(sh\,ka_1 - \sin ka_1)$ ;  $\Delta z = S^2(ka_1) - v(ka_1)T(ka_1)$  – определитель.

Для участка  $a_2 \leq z \leq a_1$ , при тех же граничных условиях, имеем аналогичную матрицу  $\varphi_1(z)$ , при этом нуль в первом столбце (8) заменяем на  $v[k(z - a_2)]$ . Для нахождения корней  $ka_1$  к имеющимся граничным условиям, при  $z = a_2$  вводим третье  $EJ\varphi''(z) = c\varphi(z)$ , где  $c$  – коэффициент жесткости упругой опоры боковой стойки.

Аналогично предыдущему, уравнение собственных форм колебаний по оси  $x$ , участков балки, при  $R_1$  – реакции первой упругой опоры,

для  $0 \leq x \leq b_1$

$$\varphi(x) = AS(kx) + BT(kx), \quad (9)$$

для  $b_1 \leq x \leq b$

$$\varphi_1(x) = AS(kx) + BT(kx) + \frac{R_1}{k^3\alpha' EJ} v[k(x - b_1)]. \quad (10)$$

Введем граничные условия по моменту и поперечной силе на свободном конце балки

$$\varphi''(b) = 0 \text{ и } \varphi'''(b) EJ = c_2 \varphi(b),$$

где  $c_2$  – коэффициент жесткости второй опоры.

С учетом собственных форм колебаний (9), (10) и граничных условий имеем систему трех уравнений, из которой получаем матричную форму колебаний для участка  $0 \leq x \leq b_1$ :

$$\varphi(x) = \frac{R}{\Delta x k^3 \alpha' EJ} \begin{vmatrix} 0 & S(kz) & T(kz) \\ T[k(b - b_1)] & u(kb) & v(kb) \\ S[k(b - b_1)\varphi] - \frac{c_2 b^3}{(kb)^3 \alpha' EJ} v[k(b - b_1)] & T(kb) - \frac{c_2 b^3}{(kb)^3 \alpha' EJ} S(kb) & u(kb) - \frac{c_2 b^3}{(kb)^3 \alpha' EJ} T(kb) \end{vmatrix}, \quad (11)$$

где  $\Delta x = \frac{c_2 b^3}{(kb)^3 \alpha' EJ} [u(kb) - v(kb)] - u^2(kb) + v(kb)T(kb)$  – определитель.

Формы колебаний  $\varphi_1(x)$  на участке  $b_1 \leq x \leq b$  получают из матрицы (11),

где нуль заменяется выражением  $v[k(x - b_1)]$ . Значения корней  $(kb)$  находят с учетом третьего граничного условия на промежуточной упругой опоре:  $\varphi'''(b_1) EJ = c_1 \varphi(b_1)$ .

Конструктивные соотношения машины:

$$a_2 = \beta_z a_1 \quad \text{и} \quad b_1 = \beta_x b,$$

где  $\beta_z$  и  $\beta_x$  – выбираются из конструктивных соображений.

Гармонические коэффициенты влияния определяют перемножением выражения собственных форм колебаний по осям  $Z$  и  $X$ :

$$\begin{aligned} W_I(z, x) &= \varphi(z) \varphi(x), & W_{II}(z, x) &= \varphi_1(z) \varphi(x), \\ W_{III}(z, x) &= \varphi_1(z) \varphi_1(x), & W_{IV}(z, x) &= \varphi(z) \varphi_1(x). \end{aligned} \quad (12)$$

$W(z, x)$  получают подстановкой в (12) координаты приложения возмущающих нагрузок вместо  $Z$  и  $X$ .

### **Выводы**

1. Проведено моделирование малогабаритного остова технологической машины, выполненного в виде отдельного модуля.
2. Рассмотренная модель позволяет достаточно точно описать характер и амплитуды вынужденных колебаний остова на стадии его проектирования.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лурье А.И. Аналитическая механика. – М.: Физматгиз, 1961.
2. Кофман Э.Д. Исследование вынужденных колебаний остова чесальных машин / Кофман Э.Д. [и др.] // *Технология текстильной промышленности*. – 1976. – № 6.
3. К вопросу исследования вынужденных колебаний малогабаритного остова делителя опары / Волков В.В., Николаев В.С., Зайцев А.В. // *Пищевая промышленность и агропромышленный комплекс: достижения, проблемы, перспективы: сборник статей V Международной научно-практической конференции*. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2011. – С. 64–67.

**УДК 004.94+621**

### **КОМПЛЕКС ПРОГРАММ КОМПЬЮТЕРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ**

- © **Д.И. Прошин**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)
- © **Р.Д. Прошина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)
- © **Е.А. Данишкина**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

### **ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF MULTICOMPONENT SYSTEMS**

- © **D.I. Proshin**, Penza State Technological University (Penza, Russia)
- © **R.D. Proshina**, Penza State Technological University (Penza, Russia)
- © **E.A. Danishkina**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В статье представлен разработанный комплекс программ компьютерно-имитационного моделирования технологических процессов машиностроения и теплоэнергетики как элемент интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий.

**Ключевые слова:** методика, модель, математическое моделирование, технологические процессы.

In an article for the assessment of environmental excellence multicomponent systems proposed rate of environmental safety and expressions for its evaluation. Examples of studies using inputted coefficient drinking water. The technique of determining the degree of environmental friendliness of multi-component systems, which allows a comprehensive analysis of the degree of environmental

73

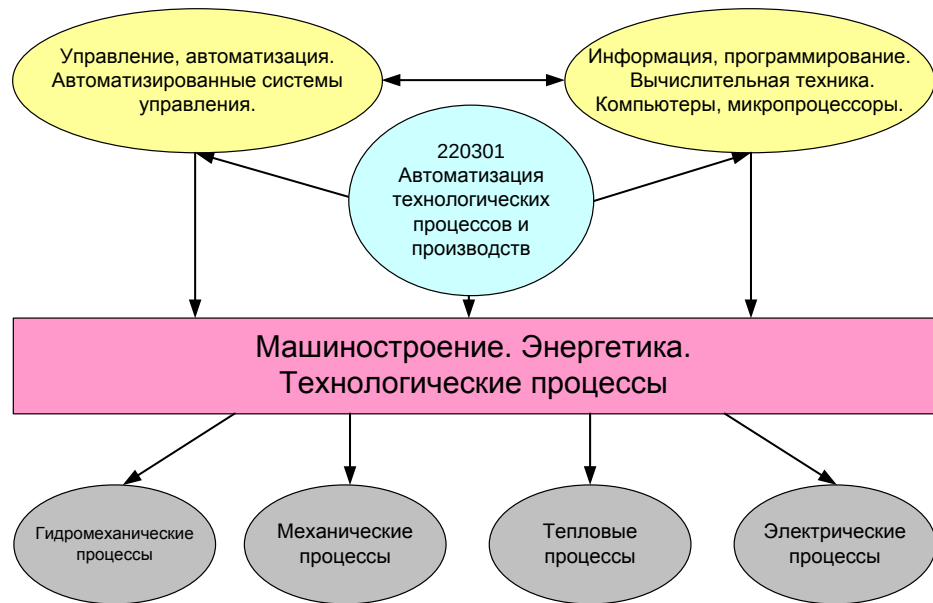


Рисунок 2 – Базовые понятия и технологические процессы специальности

Исследование технологических объектов управления (ТОУ) машиностроения и теплоэнергетики (рис. 3) основано на моделировании гидродинамических, тепловых, механических, электрических и электромеханических процессов. Математическое моделирование объектов машиностроения и систем управления ими включает исследования поведения электро- и гидромеханических объектов, следящих приводов, систем управления скоростью с использованием асинхронных электродвигателей и машин постоянного тока.



Рисунок 3 – Технологические объекты теплоэнергетики

Изучение и исследование как технологических процессов, так и управляемых вентильно-электромеханических систем проводится на основе системного, энергетического и информационно-алгоритмического причинно-следственного подходов с использованием методологии системной организации научных и учебных исследований [6].

На рис. 4 приведена структура нижнего уровня программно-технического интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ), в состав которого входит интегрированный комплекс технологических процессов (ИКТП).

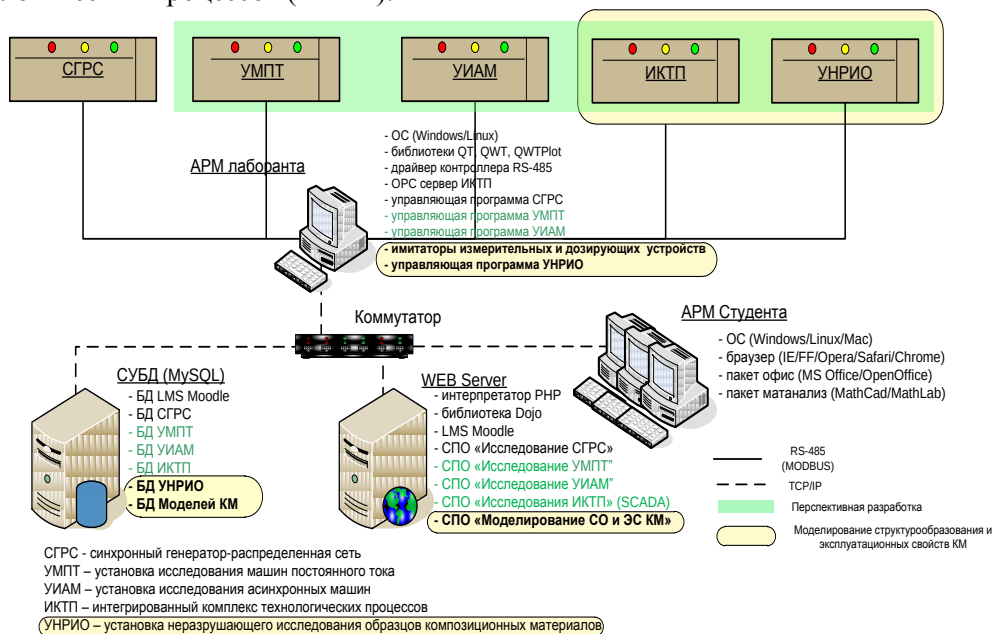


Рисунок 4 – Структура программно-технического комплекса

Рис. 5 отражает комплекс программ моделирования технологических процессов и процессов формирования структуры композита с заданными эксплуатационными свойствами, электроприводов постоянного и переменного тока, имитаторов датчиков, исполнительных механизмов автоматизированных систем управления технологическими процессами.

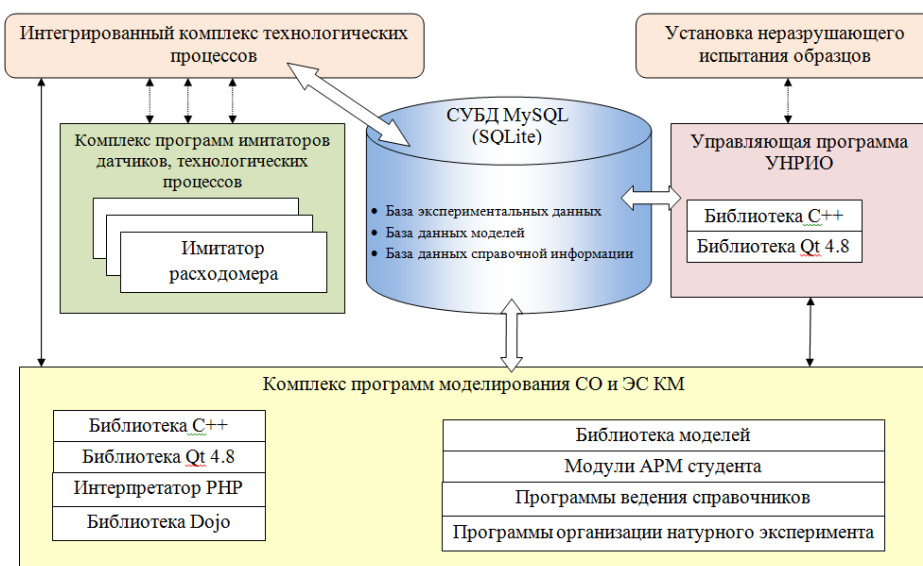


Рисунок 5 – Комплекс программ моделирования технологических процессов в структуре интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий

Математическое и компьютерно-имитационное моделирование в ИКСАЛ сочетается с исследованиями на реальных установках, в качестве которых разработаны multifunctional объекты исследования: «Синхронный генератор – распределённая электрическая сеть» (СГРС), установка исследования машин постоянного тока (УМПТ), установка исследования асинхронных машин (УИАМ), интегрированный комплекс технологических процессов.

Исследования технологических процессов машиностроения и теплоэнергетики включают в себя решение следующих задач (рис. 6).

1. Анализ технологической схемы и принципа действия ТОУ (принципиальной).
2. Анализ ТОУ как объекта управления.
3. Составление нелинейных математических моделей в абсолютных величинах.
4. Построение структурных схем нелинейных математических моделей в абсолютных величинах.
5. Составление математической модели статики. Расчёт статического режима.
6. Составление нелинейных математических моделей в относительных величинах.
7. Построение структурных схем нелинейных математических моделей в относительных величинах.
8. Линеаризация и построение линейных математических моделей ТОУ.
9. Преобразование математических моделей в пространстве состояний к математическим моделям “Вход – выход”.
10. Моделирование технологических объектов управления на компьютерах.
11. Анализ результатов моделирования ТОУ. Выводы.



Рисунок 6 – Методика исследования технологических процессов

Применение разработанного комплекса программ исследования технологических процессов в виртуально-физической среде при проведении учебных и научных исследований в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий с элементами дистанционного управления показало его высокую эффективность.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин Д.И. Подготовка высококвалифицированных кадров для предприятий машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. № 1–3. – С. 727–731.
2. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д., Сюлин П.В. Управление образовательным процессом подготовки кадров для машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. № 1(2). – С. 705–708.
3. Прошин Д.И. Структура предприятия как определяющая компонента профессиональной подготовки в вузе по вектору знаний (статья) // Alma mater (Вестник высшей школы). – 2011. – № 7. – С. 58–61.
4. Прошина Р.Д. Концепция построения интегрированных комплексов сетевых автоматизированных лабораторий / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 5(2). – С. 527–530.
5. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Интегрированный электромеханический комплекс // В мире научных открытий. – 2010. – № 4–8. – С. 27–30.
6. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Программная платформа для построения интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11. – № 5–2. – С. 531–536.
7. Прошина Р.Д. Математическое моделирование технических систем в нормальной форме пространства состояний // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 1(3). – С. 613–616.
8. Прошина Р.Д. Математическое моделирование систем управления в нормальной форме пространства состояний // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 197–202.
9. Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Принципы системной организации профессиональной подготовки в вузе // Педагогическое образование и наука. – 2009. – № 10. – С. 76–79.
10. Прошин И.А., Конопацкий Ю.В., Данишкина Е.А. Математическое моделирование испарительной части парового котла // В мире научных открытий. – 2013. – № 2. – С. 201–210.

УДК 517.958, 519.711.3

# МЕТОД КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ В ЗАДАЧЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННОГО ПРОФИЛЯ СОСУДОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

- © **В.А. Авроров**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)
- © **В.С. Николаев**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)
- © **В.В. Бурков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

# METHOD OF THE FINAL DIFFERENCES IN PROBLEM OF STABILITY TONKOSTENNOGO PROFILE CONTAINER FOOD PRODUCTION

- © **V.A. Avrorov**, Penza Stats Technology Academy (Penza, Russia)
- © **V. S. Nikolaev**, Penza Stats Technology Academy (Penza, Russia)
- © **V.V. Burkov**, Penza Stats Technology Academy (Penza, Russia)

Рассмотрен численный метод конечных разностей в применении к расчетам устойчивости тонкостенных пластин и оболочек, определены граничные условия на торце и на контуре оболочки, составлены конечноразностные выражения описания состояния оболочки.

**Ключевые слова:** метод конечных разностей, уравнение равновесия, срединная плоскость пластины и оболочки, критическая внешняя нагрузка, устойчивости симметрично нагруженных оболочек

Considered numerical method of the final differences in using to calculation of stability тонкостенных plates and shell, are determined border conditions on butt end and on sidebar of the shell, is formed конечноразностные of the expression of the description of the condition of the shell.

**Key words:** method of the final differences, equation of the balance, middle plane of the plate and shells, critical external load, stability symmetrical loaded shell.

**E-mail:** mycolo@rambler.ru

Емкостные агрегаты аппаратов пищевых и других видов производств в своем конструктивном исполнении порой имеют довольно сложный профиль, что связано со спецификой технологических процессов. Используемые аналитические методы расчета в основном применимы для простых профилей поперечных сечений. Расчет на устойчивость изотропной оболочки дифференциальными методами основан на теории пологих оболочек, где используется безмоментная и моментная теории оболочек, причем сама оболочка приводится к пластине с учётом срединной плоскости или координатной поверхности [1]. В сочетании с классическим расчетом оболочек вращения широко распространены численные методы решения задач, в частности метод конечных разностей, где решение дифференциального уравнения с непрерывными переменными осуществляют посредством замены производных конечными разностями в виде системы алгебраических выражений [2].

В задачах устойчивости тонкостенных конструкций исследуемая область пластины или обечайки разбивается на  $N$  равных отрезков (см. рис. 1). Уравнение равновесия в  $N$ -узле внутри рассматриваемой области сводится к двум дифференциальным уравнениям [2].

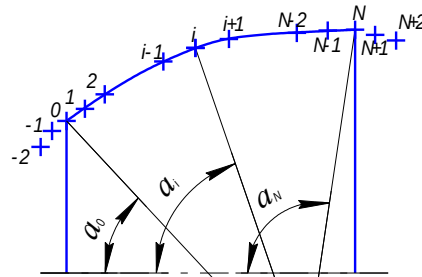


Рисунок 1 – Исследуемая область обечайки

Первое уравнение равновесия состоит из производных компоненты  $W$ , описывающей изгибные деформации

$$W^{IV} + 2\psi W''' - \left[ \psi^2 + 2m^2 + \frac{T_{11}^0}{D} \right] W'' + \left( \psi^2 + 2m^2 - \frac{T_{22}^0}{D} \right) \psi W' - \frac{\delta q_z}{D} + m^2 \left( m^2 - 4\psi^2 + \frac{T_{22}^0}{D} \right) W + \frac{12(1-\nu^2)}{h^2} \left[ (k_2 + K_{22}^0) F'' + (k_1 + K_{11}^0) (\psi F' - m^2 F) \right] = 0, \quad (1)$$

где величина  $\psi$  – зависимость от коэффициентов Ляме;  $k_1$  и  $k_2$  – величины кривизн оболочки,  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $h(\alpha_i, \alpha_{i+1})$  – толщина изотропной оболочки;  $K_{11}, K_{22}$  – компоненты изгибной деформации поверхности приведения пластины, оболочки.

Второе уравнение равновесия состоит из производных компоненты  $F$ , описывающей деформации сдвига

$$F^{IV} + 2\psi F''' - [\psi^2 + 2m^2](F'' - \psi F') + m^2(m^2 - 4\psi^2)F - (k_2 + K_{22}^0)W'' - (k_1 + K_{11}^0)(\beta\psi W' - m^2 W) = 0. \quad (2)$$

Граничные условия относительно переменной  $\alpha_1$  будут определяться системами уравнений:

$$\begin{aligned} & \text{– на торце оболочки } \alpha_1 = \alpha_1^0 \\ & w(1 - \gamma_1) + S\gamma_1 = 0 \\ & w'(1 - \gamma_2) - M_{11}\gamma_2 = 0 \\ & u(1 - \gamma_3) + T_{11}\gamma_3 = 0 \\ & w(1 - \gamma_4) - \left[ D(\Delta w)' - w'_0 T_{11} - T_{11}^0 w' \right] \gamma_4 = 0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \text{– на контуре } \alpha_1 = \alpha_1^I \\ & w(1 - \gamma_5) + S\gamma_5 = 0 \\ & w'(1 - \gamma_6) - M_{11}\gamma_6 = 0 \\ & u(1 - \gamma_7) + T_{11}\gamma_7 = 0 \\ & w(1 - \gamma_8) - \left[ D(\Delta w)' - w'_0 T_{11} - T_{11}^0 w' \right] \gamma_8 = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $u$  и  $w$  – характеризуют перемещение координатной поверхности оболочки;  $\gamma_i = 0$  при кинематических граничных условиях,  $\gamma_i = 1$  при статических граничных условиях.

Входящие в граничные условия (3) и (4) значения  $T_{11}$ ,  $S$ ,  $M_{11}$ ,  $H$  характеризуют усилия и моменты, приведённые к срединной плоскости, являющейся координатной поверхностью, пластины или оболочки и выражаются через деформации и радиусы кривизны оболочки. Их значения имеют вид:

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{Eh}{1 - \nu^2} (E_{11} + \nu E_{22}), \\ M_{11} &= \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} (K_{11} + \nu K_{22}), \\ S &= \frac{Eh}{2(1 + \nu)} E_{12}, \\ H &= \frac{Eh^3}{12(1 + \nu)} K_{12}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $E_{11}$ ,  $E_{12}$ ,  $K_{11}$ ,  $K_{12}$  – соответственно, удлинения, сдвиг, изменение кривизн и кручение поверхности приведения оболочки.

Из показанного следует, что задача устойчивости осесимметрично нагруженной оболочки вращения сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с граничными условиями. Это позволяет использовать численный метод конечных разностей. При условии удовлетворения нейтрального равновесия и назначенных граничных условий посредством разностных приближений будем иметь:

$$\begin{aligned}
 y' &= \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta s}; \\
 y'' &= \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta s)^2}; \\
 y''' &= \frac{y_{i+2} - 2y_{i+1} + 2y_{i-1} - y_{i-2}}{2(\Delta s)^3}; \\
 y^{IV} &= \frac{y_{i+2} - 4y_{i+1} + 6y_i - 4y_{i-1} + y_{i-2}}{(\Delta s)^4},
 \end{aligned} \tag{6}$$

где  $y = F, W$ ;  $\Delta s = \frac{A_1}{N}(\alpha_N - \alpha_0)$ ;  $N$  – число разбиений образующей оболочки;  $A_1$  – коэффициент Ляме.

Для оболочки вращения осевая координата узла  $y_i$  определяется выражением

$$\alpha_i = \alpha_0 + i\Delta\alpha \quad (i = 0, 1, \dots, N). \tag{7}$$

Формулировка граничных условий на торцах оболочки требует четыре дополнительных узла, расположенных вне области оболочки. В уравнение нейтрального равновесия, представленного в конечных разностях в граничных узлах  $\alpha = \alpha_0$  и  $\alpha = \alpha_N$ , записывается восемь граничных условий, откуда получают систему  $2(N+5)$  линейных однородных алгебраических уравнений. Определитель такой системы приравняется к нулю с учётом дифференциальных выражений разностных приближений (6). Уравнение нейтрального равновесия в конечно-разностном виде, с учетом  $b_{ij}$  коэффициента распределенной нагрузки по узлам, будет

$$\sum_{k=0}^4 b_{2k+1,i} F_{k+i-2} + \sum_{k=2}^4 b_{2k,i} W_{k+i-3} = 0; \tag{8}$$

$$\sum_{k=0}^4 b_{2k+10,i} W_{k+i-2} + \sum_{k=2}^4 b_{2k+7,i} F_{k+i-3} = 0. \tag{9}$$

Очевидно, что решение системы уравнений (8) и (9) будет только в том случае, если определитель матрицы этой системы будет равен нулю. Тогда задача сводится к отысканию корней уравнения  $\overline{D}_m(\lambda) = 0$ , где  $D(\lambda)$  – определитель системы уравнений, а  $\lambda$  – характеризующая величина внешней нагрузки. Решение уравнений типа (8) осуществляется для нечётных узлов, а уравнений (9) – для чётных.

В работе [1] рассмотрено определение элементов матрицы коэффициентов полученной системы однородных алгебраических уравнений. Матрица коэффициентов определителя имеет девятидиагональную структуру и вычисляется по формуле

$$\overline{D}(\lambda) = \prod_{s=1}^{2N+6} a_{11}^{(s)}. \tag{10}$$

Для вычисления девятидиагонального определителя системы применяют метод Гаусса, где определитель системы линейных однородных алгебраических уравнений имеет вид

$$\sum_{j=i-4}^{i+4} a_{ij}^{(i)} X_j = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 2N + 6; \quad 1 \leq j \leq 2N + 6), \quad (11)$$

где

$$a_{ij}^{(s+1)} = a_{i+1,j+1}^{(s)} - \frac{a_{i+1,j}^{(s)}}{a_{11}^{(s)}} a_{1,j+1}^{(s)} \quad \text{при} \quad (j \leq 4, \quad i \leq 4), \quad (12)$$

$$a_{ij}^{(s+1)} = a_{i+1,j+1}^{(s)} \quad \text{при} \quad (j > 4, \quad i > 4). \quad (13)$$

Решение системы строится заданием  $X_j$  ( $1 \leq j \leq 2N + 6$ ). В этом случае значение  $X_i$  определится уравнением вида:

$$X_i = -\frac{1}{a_{ii}^{(i)}} \sum_{j=i+1}^{i+4} a_{ij}^{(i)} X_j \quad (i = 2N + 5, \dots, 2, 1; \quad j \leq 2N + 6), \quad (14)$$

причем

$$\begin{aligned} W_k &= X_{2k+4} & (k = -1, \dots, N + 1) \\ F_k &= X_{2k+3} & (k = -1, \dots, N + 1) \end{aligned} \quad (15)$$

Наименьшее собственное значение системы будет характеризоваться величиной  $\lambda$  перехода от осесимметричного состояния в определителе системы уравнений ее нейтрального равновесия. Вычисление  $\bar{D}(\lambda)$  при определении знака производится по формуле

$$\text{sign} \bar{D}(\lambda) = \prod_{s=1}^{2N+6} \frac{a_{11}^{(s)}}{|a_{11}^{(s)}|},$$

Здесь искомой величиной является критическая внешняя нагрузка  $\lambda^*$ , которая окончательно будет определяться интервалом

$$\lambda(n) \leq \lambda^*(n) \leq \lambda(n) + \Delta\lambda.$$

Откуда следует, что для нахождения критических значений параметра внешней нагрузки  $\lambda^*$  может использоваться система восьми дифференциальных уравнений первого порядка относительно неизвестных (3), (4). Задача о собственных значениях уравнений (3), (4) соответствует методу Эйлера в теории устойчивости упругих систем. Поскольку внешние нагрузки предполагаются консервативными, то решение задачи об устойчивости оболочек можно проводить, не прибегая к исследованию колебаний нагрузок вблизи положения равновесия. Таким образом, задача устойчивости симметрично нагруженных оболочек сводится к отысканию собственных значений параметра  $\lambda^*$  для системы обыкновенных дифференциальных уравнений с граничными условиями (3).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман В.Л. *Механика тонкостенных конструкций. Статика*. – М. : Машиностроение, 1977. – 448 с. – (Б-ка расчетчика).
2. *Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций* / Кармишин А.В., Лясковец В.А., Мяченков В.И., Фролов А.Н. – М. : Машиностроение, 1975. – 376 с.
3. *К вопросу исследования сложных профилей тонкостенных сосудов пищевых производств в задачах их устойчивости* / Авроров В.А., Николаев В.С. // *Пищевая промышленность и агропромышленный комплекс: достижения, проблемы, перспективы : сборник статей V Международной научно-практической конференции*. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2011. – С. 67–71.

**УДК 004.942+621.565.94**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ  
АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕГРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА  
СЕТЕВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛАБОРАТОРИЙ**

© **И.А. Прошин**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **Н.Н. Прошина**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **Е.А. Данишкина**, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)

© **Н.Н. Короткова**, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)

**MATHEMATICAL MODELING OF HEAT EXCHANGE IN CONDITION OF  
INTEGRATED COMPLEX OF NET COMPUTER- AIDED LABORATORIES**

© **I.A. Proshin**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **N.N. Proshina**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **E.A. Danishkina**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **N.N. Korotkova**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В статье разработан комплекс компьютерно-имитационного моделирования теплообменных установок в виртуально-физической среде, для которого построены математические модели в пространстве состояний и приведены результаты моделирования, отражающие возможности проведения исследований тепловых объектов в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий.

**Ключевые слова:** методика, модель, математическое моделирование, теплообменник.

In the article there is developed a complex of computer-imitation modeling of heat exchange installation in virtual physical medium, for which mathematical patterns in the sphere of conditions are built and the modeling results showing opportunities to carry out research of heat objects in condition of integrated complex of net computer-aided laboratories are led.

**Key words:** methods, modeling, mathematical modeling, heat-exchange unit.

**E-mail:** proshin.Ivan@inbox.ru

Проведение комплексных исследований технологических процессов машиностроения и теплоэнергетики в интегрированном комплексе сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) объединяет множество технологических процессов: механических, электромеханических, гидродинамических, тепловых и др.

Целью данной работы является разработка единой системы компьютерно-имитационного моделирования теплообменных аппаратов для проведения учебных и научных исследований как составной части интегрированной системы моделирования объектов в пространстве компонент вектора знаний [1–6] по направлению или по специальности.

Основа математического моделирования в ИКСАЛ – разработанная авторами методология системной организации научных и учебных исследований [7] (рис. 1).

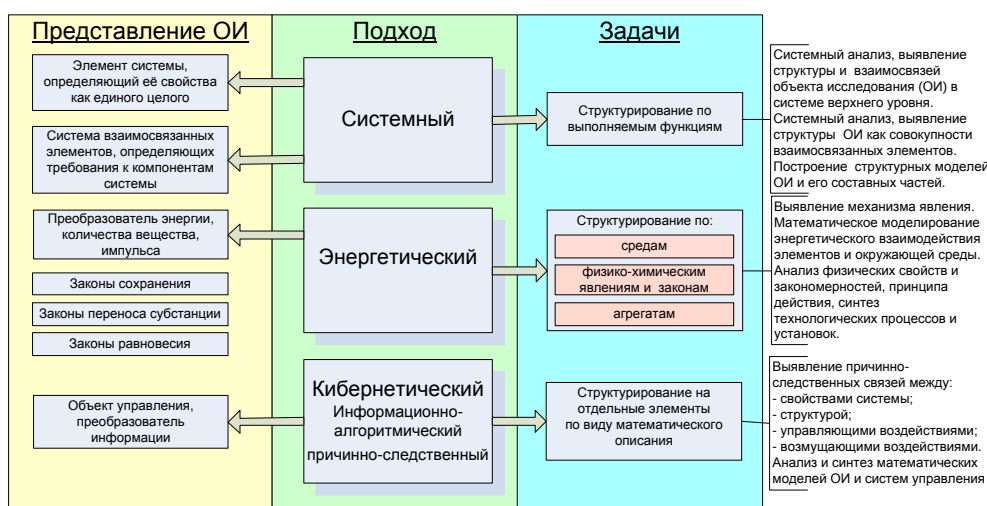


Рисунок 1 – Методология системной организации научных исследований в интегрированном комплексе сетевых автоматизированных лабораторий

Математические модели теплообменных устройств зависят от их назначения, принципа действия и конструктивных особенностей. В качестве примера рассмотрим поверхностные теплообменники, перенос тепла в которых происходит через разделяющую поверхность теплообмена между двумя веществами.

В общем технологическом процессе теплообменник как элемент системы выполняет функцию нагрева или охлаждения какого-либо объекта. В соответствии с его функциональным назначением формируются технические требования к математической модели.

Анализируемое теплообменное устройство как система взаимосвязанных элементов состоит из трубной системы (поверхности нагрева) и корпуса (оболочки). Снаружи и внутри трубы омываются теплоносителями, один из которых греющий, другой – нагреваемый.

Выходная величина теплообменника – изменение температуры жидкого продукта  $T_{ж}$ , входные величины – изменение расхода пара  $F_{п}$ , расхода жидкого продукта  $F_{ж}$  и его температура на входе  $T_{ж1}$ . Принципиальная и параметрическая схемы такого технологического объекта приведены на рис. 2.

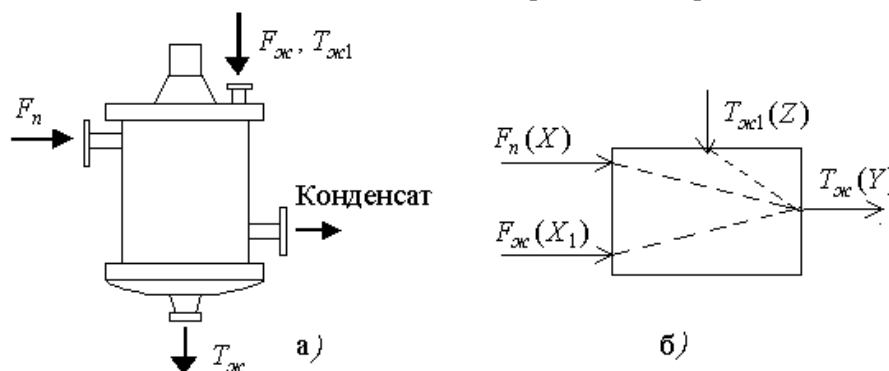


Рисунок 2 – Принципиальная (а) и параметрическая (б) схемы теплообменника

Результат декомпозиции теплообменника по средам позволяет представить в соответствии с энергетическим подходом процесс преобразования энергии и количества вещества в виде структурной схемы, приведённой на рис. 3.

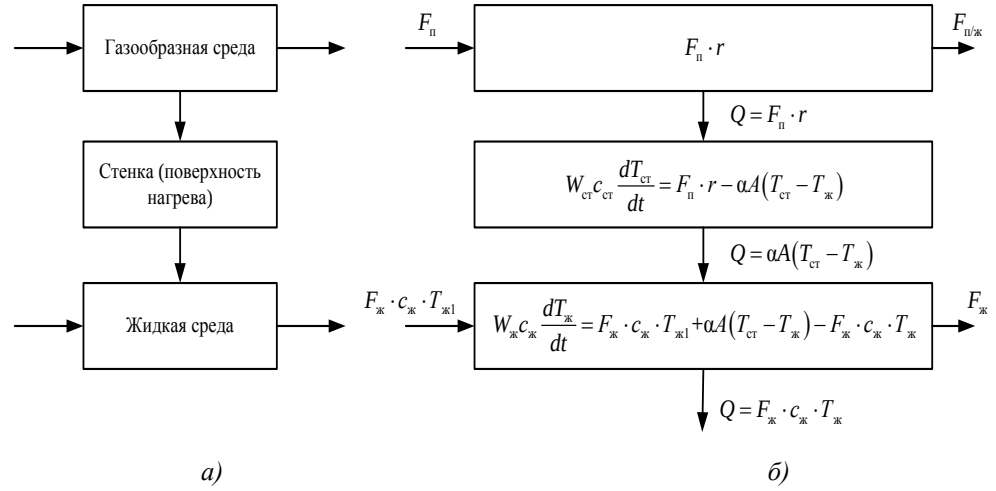


Рисунок 3 – Механизм преобразования энергии и количества вещества:  
а) декомпозиция объекта по средам, б) структура преобразования энергии и количества вещества

Построение математической модели на основе энергетического подхода применительно к рассматриваемому объекту (рис. 3) обуславливает необходимость составления уравнения энергетического баланса для теплопередающих стенок и уравнение теплового баланса для жидкости:

$$W_{ст} c_{ст} \frac{dT_{ст}}{dt} = F_{п0} r - \alpha A (T_{ст} - T_{ж0}); \quad (1)$$

$$W_{ж} c_{ж} \frac{dT_{ж}}{dt} = F_{ж0} c_{ж} T_{ж1} + \alpha A (T_{ст} - T_{ж0}) - F_{ж0} c_{ж} T_{ж0}. \quad (2)$$

Уравнения теплового баланса для равновесного состояния теплообменника получим из уравнений (1) и (2) посредством подстановки в них установившихся значений переменных ( $T_{ст0}$ ,  $F_{п0}$ ,  $T_{ж0}$ ,  $F_{ж0}$ ). При этом производные  $\frac{dT_{ст}}{dt}$  и  $\frac{dT_{ж}}{dt}$  равны нулю, а система уравнений, описывающих равновесное состояние теплообменника, приводится к виду:

$$F_{п0} r = \alpha A T_{ст0} - \alpha A T_{ж0};$$

$$F_{ж0} c_{ж} T_{ж1} + \alpha A T_{ст0} - \alpha A T_{ж0} = F_{ж0} c_{ж} T_{ж0}. \quad (3)$$

После линеаризации ММ теплообменника получим линейную систему дифференциальных уравнений теплообменника:

$$W_{ст} c_{ст} T_{ст0} \frac{dY_{ст}}{dt} = F_{п0} r X_1 - \alpha A T_{ст0} Y_{ст} + \alpha A T_{ж0} Y; \quad (4)$$

$$W_{ж} c_{ж} T_{ж0} \frac{dY_{ж}}{dt} = -F_{ж0} c_{ж} (T_{ж0} - T_{ж1}) X_2 + F_{ж0} c_{ж} T_{ж1} Z + \alpha A T_{ст0} Y_{ст} - \alpha A T_{ж0} Y - F_{ж0} c_{ж} T_{ж0} Y, \quad (5)$$

где

$$Y = \frac{\Delta T_{ж}}{T_{ж0}}; \quad Y_{ст} = \frac{\Delta T_{ст}}{T_{ст0}}; \quad X_1 = \frac{\Delta F_{п}}{F_{п0}}; \quad X_2 = \frac{\Delta F_{ж}}{F_{ж0}}; \quad Z = \frac{\Delta T_{ж1}}{T_{ж10}}$$



Уравнение динамики теплообменника:

$$T_1^2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + T_2 \frac{dY}{dt} + Y = kX_1 - k(X_2 + T_3 \frac{dX_2}{dt}) + (1-k)(Z + T_3 \frac{dZ}{dt}), \quad (6)$$

где постоянные времени имеют следующие значения:

$$T_1^2 = \frac{W_{\text{ст}} W_{\text{ж}} c_{\text{ст}}}{\alpha A F_{\text{ж}0}}; \quad T_2 = \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{\alpha A} + \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{F_{\text{ж}0} c_{\text{ж}}} + \frac{W_{\text{ж}}}{F_{\text{ж}0}}; \quad T_3 = \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{\alpha A}; \quad k = \frac{T_{\text{ж}0} - T_{\text{ж}10}}{T_{\text{ж}0}}.$$

Уравнение (6) в изображениях Лапласа примет вид

$$(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)Y(p) = kX_1(p) - k(T_3(p) + 1)X_2(p) + (1-k)(1 + T_3(p))Z(p).$$

Из последнего уравнения следует:

$$Y(p) = W_{x1}(p)X_1(p) - W_{x2}(p)X_2(p) + W_z(p)Z(p),$$

где  $W_{x1}(p)$ ,  $W_{x2}(p)$ ,  $W_z(p)$  – передаточные функции теплообменника:

$$\text{по каналу } X_1(p) \rightarrow Y(p) \quad W_{x1}(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

$$\text{по каналу } X_2(p) \rightarrow Y(p) \quad W_{x2}(p) = \frac{k(T_3 p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

$$\text{по каналу } Z(p) \rightarrow Y(p) \quad W_z(p) = \frac{(1-k)(T_3 p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

$Y(p)$ ,  $X_1(p)$ ,  $X_2(p)$ ,  $Z(p)$  – изображения Лапласа соответствующих величин.

Таким образом, рассматриваемый теплообменник является устойчивым объектом 2-го порядка.

Уравнение (6) подтверждает, что увеличение расхода пара  $X_1$  и температуры жидкости на входе  $Z$  приведёт к повышению температуры жидкости на выходе  $Y$ , а возрастание расхода жидкости  $X_2$  – к понижению величины  $Y$ .

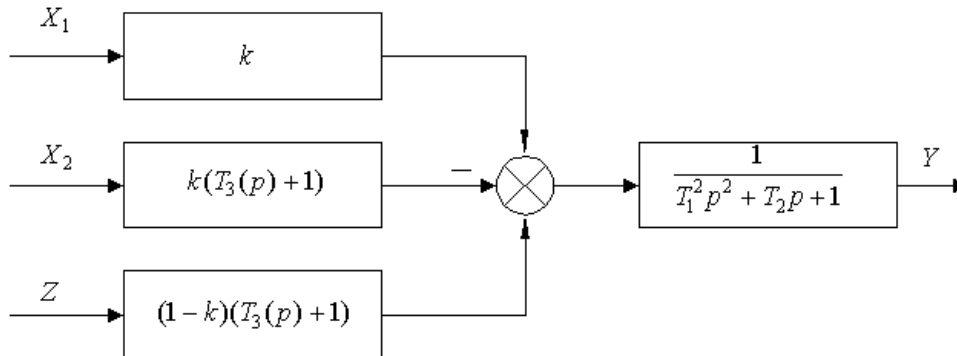


Рисунок 4 – Структурная схема теплообменника в виде устойчивого объекта второго порядка

На основании системы уравнений (4) и (5) составим математическую модель теплообменника в пространстве состояний с использованием физических переменных в относительных величинах:

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T^*} & \frac{k_4}{T^*} \\ \frac{k_5}{T^{**}} & -\frac{1}{T^{**}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_1}{T^*} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_2}{T^{**}} & \frac{k_3}{T^{**}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ Z \end{bmatrix};$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Здесь

$$T^* = \frac{W_{\text{ст}} c_{\text{ст}}}{\alpha A}; \quad T^{**} = \frac{W_{\text{ж}} c_{\text{ж}}}{F_{\text{ж}0} c_{\text{ж}} + \alpha A}; \quad k_1 = \frac{r F_{\text{п}0}}{\alpha A T_{\text{ст}0}}; \quad k_2 = \frac{F_{\text{ж}0} c_{\text{ж}} (T_{\text{ж}0} - T_{\text{ж}10})}{(F_{\text{ж}0} c_{\text{ж}} + \alpha A) T_{\text{ж}0}};$$

$$k_3 = \frac{F_{\text{ж}0} c_{\text{ж}} T_{\text{ж}10}}{(F_{\text{ж}0} c_{\text{ж}} + \alpha A) T_{\text{ж}0}}; \quad k_4 = \frac{T_{\text{ж}0}}{T_{\text{ст}0}}; \quad k_5 = \frac{\alpha A T_{\text{ст}0}}{(F_{\text{ж}0} c_{\text{ж}} + \alpha A) T_{\text{ж}0}}.$$

Вектор координат состояния  $\bar{V} = [v_1 \quad v_2]^T = [Y_{\text{ст}} \quad Y]^T$ .

Переходные характеристики теплообменника по каналам  $X_1 \rightarrow Y$  (а, б) и  $X_2 \rightarrow Y$  (в, г), а также  $Z \rightarrow Y$  (д, е) приведены на рис. 5.

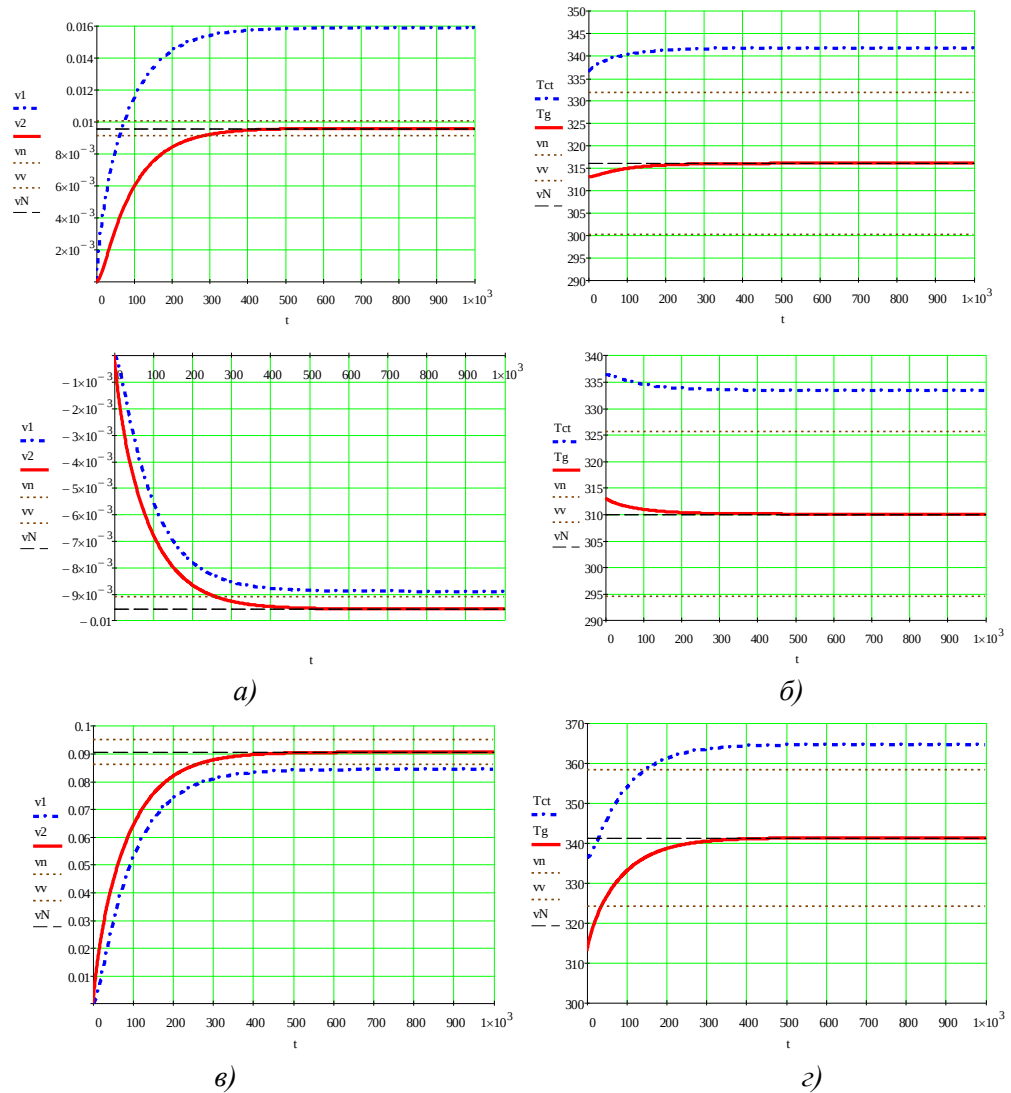


Рисунок 5 – Переходные характеристики теплообменника, соответственно, в относительных и в абсолютных величинах по входным воздействиям  $X_1$  (а, б),  $X_2$  (в, г),  $Z$  (д, е)

Математическое моделирование проведено в среде Mathcad при следующих параметрах объекта:

$$T^* = 20,485; \quad T^{**} = 23,993;$$

$$k_1 = 0,069; \quad k_2 = 0,042; \quad k_3 = 0,395; \quad k_4 = 0,931; \quad k_5 = 0,605.$$

Статический коэффициент передачи по входным воздействиям  $X_1$  ( $X_1 = 0,1$ ) и  $X_2$  ( $X_2 = 0,1$ ) равен 0,09, что соответствует значениям коэффициента  $k$  в модели (6)

$$k = \frac{T_{ж0} - T_{ж10}}{T_{ж0}} = \frac{313 - 283}{313} = 0,096.$$

По возмущающему воздействию  $Z$  ( $Z = 0,1$ ) коэффициент передачи составил 0,91, что также равно соответствующему коэффициенту в модели (6).

$$1 - k = 1 - \frac{T_{ж0} - T_{ж10}}{T_{ж0}} = \frac{T_{ж10}}{T_{ж0}} = \frac{283}{313} = 0,904$$

Относительные значения температуры стенки для первых двух воздействий превышают значение температуры жидкого продукта, а для воздействия  $Z$  меньше относительного значения температуры жидкости. Абсолютные значения температуры стенки при всех воздействиях выше, чем температуры жидкого продукта. В установившемся режиме после нанесения воздействий, равных 10 % от установившихся значений входных величин, они составили:

для первого воздействия  $X_1$

$$T_{ст} = (1 + Y_{ст}) T_{ст0} = (1 + 0,016) \cdot 336 = 341 \text{ (}^\circ\text{K)},$$

$$T_{ж} = (1 + Y) T_{ж0} = (1 + 0,0096) \cdot 313 = 316 \text{ (}^\circ\text{K)};$$

для второго воздействия  $X_2$

$$T_{ст} = (1 + Y_{ст}) T_{ст0} = (1 - 0,00892) \cdot 336 = 333 \text{ (}^\circ\text{K)},$$

$$T_{ж} = (1 + Y) T_{ж0} = (1 - 0,0096) \cdot 313 = 310 \text{ (}^\circ\text{K)};$$

для третьего воздействия  $Z$

$$T_{ст} = (1 + Y_{ст}) T_{ст0} = (1 + 0,084) \cdot 336 = 364 \text{ (}^\circ\text{K)},$$

$$T_{ж} = (1 + Y) T_{ж0} = (1 + 0,09) \cdot 313 = 341 \text{ (}^\circ\text{K)}.$$

Разработанный модуль ИКСАЛ по моделированию теплообменных установок позволяет проводить исследования статических и динамических режимов технологических объектов управления в относительных и динамических режимах на базе математических моделей «Вход – выход» и в пространстве состояний с использованием физических переменных и на основе математических моделей нормальной, канонической и комбинированных форм, формы простых множителей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин Д.И. Подготовка высококвалифицированных кадров для предприятий машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. № 1–3. – С. 727–731.

2. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д., Сюлин П.В. Управление образовательным процессом подготовки кадров для машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. № 1(2). – С. 705–708.

3. Прошин Д.И. Структура предприятия как определяющая компонента профессиональной подготовки в вузе по вектору знаний (статья) // *Altamater* (Вестник высшей школы). – 2011. – № 7. – С. 58–61.

4. Прошин И.А. Концепция построения интегрированных комплексов сетевых автоматизированных лабораторий / Прошин И.А. [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 5(2). – С. 527–530.

5. Прошина Р.Д. Математическое моделирование технических систем в нормальной форме пространства состояний // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 1(3). – С. 613–616.

6. Прошина Р.Д. Математическое моделирование систем управления в нормальной форме пространства состояний // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 4. – С. 197–202.

7. Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Принципы системной организации профессиональной подготовки в вузе (статья) // Педагогическое образование и наука. – 2009. – № 10. – С. 76–79.

УДК 517.958, 519.711.3

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПО ИНФОРМАЦИОННЫМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ

© В.С. Николаев, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© В.А. Авроров, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© В.В. Волков, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© А.М. Бочков, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### MODELING OF THE TECHNOLOGICAL MACHINE ON INFORMATION FUNCTIONAL PARAMETER

© V.S. Nikolaev, Penza Stats Technology University (Penza, Russia)

© V.A. Avrorov, Penza Stats Technology University (Penza, Russia)

© V.V. Volkov, Penza Stats Technology University (Penza, Russia)

© A.M. Bochkov, Penza Stats Technology University (Penza, Russia)

Определены основные технологические и технические параметры модели технологической машины по переработке волокнистой ленты, определена функция цели в виде главного информационного параметра качества, описываемого коэффициентом вариации неровноты ленты по отрезкам, определены основные этапы моделирования технической ситемы.

**Ключевые слова:** моделирование, технологическая машина, линейная плотность (развес) волокнистой ленты, главный и основные параметры, передаточная функция, критерии входных и выходных параметров модели.

The Development main stage modeling of the technological machine on conversion of the stringy tape, are determined main technological and technical parameters to models, is determined main parameter quality in the manner of function of the purposes, described by factor вариации неровноты of the tape on length

**Key words:** modeling, technological machine, linear density (VWVweigh out) of the stringy tape, main and the main parameters, transmission function, criteria input and output parameter modeli.

**E-mail:** mycolo @ rambler.ru

Известно, что качество технологических процессов зависит от точности взаимодействия исполнительных механизмов с перерабатываемым материалом. Оно характеризуется кинематическими и силовыми связями в механизмах, их геометрическими размерами и пространственной компоновкой. Построение информационной модели процесса предусматривает выполнение двух процедур: определение схемы технологических процессов, взаимодействующих между собой; назначение главных и основных информационных параметров моделирования изделия [1].

*Компоновка модели технологической ленточной машины.* Моделирование ленточного оборудования является актуальным [2], поскольку требования высокой производительности с одновременным обеспечением качественных показателей волокнистой ленты должно сочетаться с надежным протеканием технологического процесса. Последовательность технологических процессов ленточной машины, представленная схемой на рис. 1, определяется пятью основными технологическими этапами  $i = \overline{1,5}$ . Процессы переработки волокнистой ленты характеризуются ее физико-механическими параметрами, которые включают линейную плотность волокнистой ленты  $T_i$ , степень распрямленности волокон  $p_i$ , разьединенность и ориентацию волокон  $r_i$  и  $O_i$ , и в общем виде модель описывается функцией  $T_{i+1} = f(T_i(p_i, r_i, O_i))$ .

Очевидно, линейная плотность волокнистой ленты после каждого технологического этапа будет меняться. Если плотность ленты после первого этапа «выема ленты» составляет  $T_1$ , то после второго этапа «транспортирования» ее плотность будет  $T_2$ . Тогда последовательность изменения параметров плотности волокнистой ленты составит:

$$T_1, \quad T_2 = T_1/Z_2, \quad T_3 = n \cdot T_2/Z_3, \quad T_4 = T_3/Z_4, \quad T_5 = T_4/Z_5, \quad (1)$$

где  $n$  – число складываемых лент,  $Z_i$  – параметр вытяжки технологического перехода ( $i = \overline{1,5}$ ),  $T_i$  – параметр линейной плотности (развес) волокнистой ленты, соответствующий технологическому переходу.

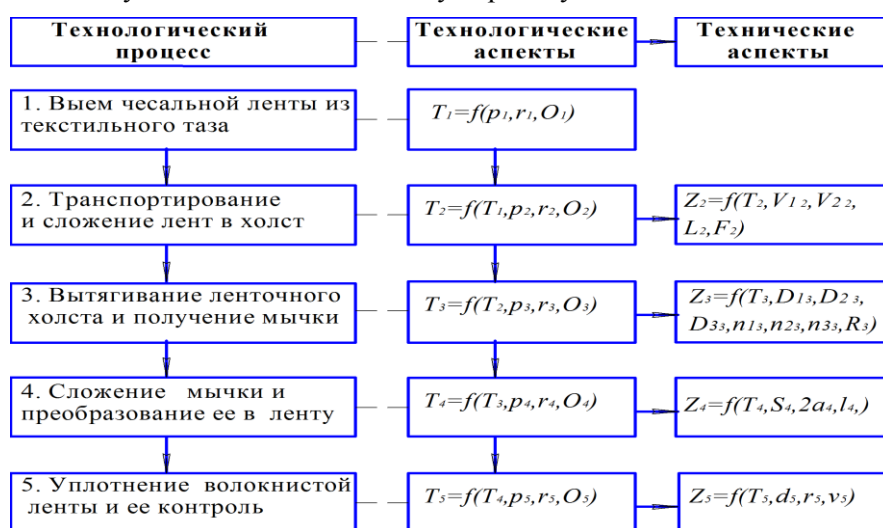


Рисунок 1 – Схема последовательной связи технологических процессов на ленточной машине и способы их функционального описания

*Моделирование технической системы*, а именно ленточной машины, представляет связанную совокупность элементов, взаимодействующих между собой в процессе функционирования. Оно осуществляется на основе признаков отдельных технологических процессов, описываемых уравнениями или функциями, которые могут быть линейными и нелинейными, алгебраическими и логическими, разностными и дифференциальными. Тип процесса также определяет математическую модель, например: дискретную или непрерывную, стационарную или нестационарную, детерминированную или стохастическую и др.

Решение задачи об основных геометрических параметрах конструкции механизмов машины показывает, что геометрия исследуемого узла, выполняющего заданную операцию, является определяющей характеристикой, а характер движения исполнительного органа, описываемый алгебраическими и трансцендентными уравнениями, относится к выходному параметру.

Описание модели осуществляют посредством операторов или соотношений взаимосвязанности входной и выходной информации. Выходная информация технологического перехода  $(i = \overline{1, 5})$ , реализуемого в ленточной машине, характеризуется параметром линейной плотности  $T_i$  волокнистой ленты. Площадь сечения волокнистой ленты выразим через сумму  $m$  волокон, попавших в данное сечение  $\sum_{j=1}^m S_{vj}$ ,  $(j = \overline{1, m})$ , тогда отрезок единичной длины  $(l = 1)$  с плотностью волокна  $\rho_v$  будет иметь линейную плотность ленты на  $i$ -м технологическом этапе

$$T_i = \rho_v \sum_{j=1}^m S_{vji}, \quad (j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n}). \quad (2)$$

Ориентация волокна в ленте может быть продольной, поперечной или угловой по отношению к оси ленты при разном качестве распрямленности волокон. Изменение пространственной ориентации волокон наблюдается после каждого технологического этапа. Такие факторы существенно влияют на параметр линейной плотности волокнистой ленты. Площадь поперечного сечения *сжатой ленты* в первом приближении может быть выражена суммой разного вида сечений волокон, являющейся случайной стохастической величиной. Распрямление и параллелизация волокон на последующих этапах переработки ленты позволяют условно принять площадь сечения *сжатой ленты* через соотношение  $S_l = m S_v$ , где  $S_v$  выражается диаметром волокна  $S_v = S_{vj} = \pi d_{vj}^2 / 4$  (так, при установленном типе волокон условно принимается  $d_{v1} = d_{v2} = \dots = d_{vj} = \dots = d_{vm}$ ).

Техническим показателем связи технологических элементов машины является вытяжка  $Z_i$ . Она достигается за счет разности линейных скоростей исполнительных роторов (цилиндров). Связь постоянных геометрических  $d_{p,i}$  и кинематических  $n_{p,i}$  параметров исполнительных элементов с переменными силовыми  $F_{mp,i}$  факторами и физическими свойствами материала ленты  $T_l$  позволяет выразить модель скорости  $V_i$  движения ленты через функцию:

$$V_i = V(\pi, d_{p,i}, n_{p,i}, F_{mp,i}, T_l). \quad (3)$$

Это обуславливает параметр вытяжки  $Z_i = \frac{V_{i+1}}{V_i}$ , ( $i = \overline{1, n}$  при  $n = 5$ ).

Очевидно, характер изменения плотности волокнистой ленты после каждого технологического этапа выражается через *передаточные отношения*. Критерий состояния каждого технологического этапа системы в общем виде можно выразить передаточной функцией  $W_{ij}$  и представить в виде матрицы

$$\begin{pmatrix} T_1(Z_1) \\ T_2(Z_2) \\ T_3(Z_3) \\ T_4(Z_4) \\ T_5(Z_5) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} & W_{14} & W_{15} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} & W_{24} & W_{25} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} & W_{34} & W_{35} \\ W_{41} & W_{42} & W_{43} & W_{44} & W_{45} \\ W_{51} & W_{52} & W_{53} & W_{54} & W_{55} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_{55} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Количество столбцов и строк матрицы определяется технологическими этапами. Элементы матрицы (4), означающие значение критерия, должны соответствовать определенному дискретному состоянию системы. При дискретном поступлении информации в схему формирования критерия мерой качества работы системы будет функционал дискретных значений аргумента, который можно интерпретировать функциями нескольких переменных, входящих в область допустимых значений вектора управления. Критерии, расположенные вне диагонали матрицы (4) из-за их малости, можно опустить, т.е.  $W_{ij} = 0$ , где  $i \neq j$ , что позволяет получить диагональную матрицу передаточных функций технологических процессов.

Значение критерия  $W_{ij}$  определяется отношением входного и выходного параметров линейной плотности волокнистой ленты. Из условия *идеальной* линейной плотности волокнистой ленты на входе в систему, приравняв передаточное отношение к параметру вытяжки, имеем критерии  $W_{ij}$ , расположенные по диагонали матрицы, которые равны

$$W_{ij} = T_{i+1}/T_i = Z_j, \text{ где } i = j, \quad (5)$$

откуда  $T_{i+1} = Z_j T_i$ , причем плотность ленты в виде системы с распределенными параметрами [3] на выходе машины составит

$$T_n = \frac{1}{n} \sum_{i=j=1}^n Z_j T_i, \quad (n = 5). \quad (6)$$

Тогда целевая функция общей вытяжки ленточной машины

$$Z_{\max} = \prod_{j=1}^n Z_j. \quad (7)$$

Выражение вытяжки  $Z_j$  технологических механизмов конструкции позволяет назначить коэффициенты веса критериев передаточных отношений технологических этапов или через коэффициент веса  $a_j$  критерия

$$Z_{\max} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot a_4 \cdot a_5, \quad (j = \overline{1, n}). \quad (8)$$

Коэффициенты веса критерия зависят от вида вытяжки и численно ей равны  $a_j = Z_j = V_{j+1}/V_j$ , где  $V_j$  и  $V_{j+1}$  – линейные скорости движения ленты на входе и выходе из технологического механизма. Это обусловлено видом вы-

тяжки – первого и второго рода, характеризуемой деформациями в волокнистой ленте, где, соответственно:

- внутренние деформации не нарушают связи между волокнами,
- внутренние деформации разрушают связи между волокнами.

Тогда весовое значение при аналитическом истолковании примет вид:

$$a_j = \begin{cases} \text{при } 1 \leq Z_j \leq 1,4 \\ \text{при } 1,75 \leq Z_j \leq 8 \end{cases}, \quad (j = \overline{1, n}). \quad (9)$$

Описание модели технологической машины основано на классификации исходной информации ее технологических механизмов и включает: вход  $T_i$  (заданный фактор); выход как критерий оптимизации  $W_{ij}$  процесса; управляющий параметр  $Z_j$  (объект управления, не подвергающийся оптимизации). Поскольку эти величины являются функциями независимого переменного времени –  $W_{ij}(t)$ ,  $Z_j(t)$ ,  $T_i(t)$ , то множество функций в модели определится оператором общего вида

$$W_{ij} = f(Z_j, T_i, t). \quad (10)$$

Функции (10) представляются множеством векторов соответствующей размерности и определяются системой функций множества параметров:

$$\begin{aligned} W_{ij} &= \{W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{in}\}; \\ Z_j &= \{Z_{j1}, Z_{j2}, \dots, Z_{jn}\}; \\ T_i &= \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{in}\}. \end{aligned} \quad (11)$$

В случае дискретного изменения выходной характеристики, остающейся постоянной до формирования нового управления, можно записать  $W_{ij} = f(Z_j, T_i)$ . Система функций (11), в зависимости от их идентификации, может состоять из дифференциальных и (или) алгебраических уравнений вида:

$$\begin{aligned} W_{ij} &= f(Z_j, T_i, A_i, t) \\ &\dots\dots\dots \\ T_{i1} &= f_i(T_{i+1}, p_i, r_i, O_i, A_i, t) \\ T_{im} &= f_i(T_{i+1}, p_i, r_i, O_i, A_i, t) \\ &\dots\dots\dots \\ Z_{j1} &= f_j(T_{i+1(i=j)}, n_j, K_j, F_j, A_i, t) \\ Z_{jm} &= f_j(T_{i+1(i=j)}, n_j, K_j, F_j, A_i, t), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $m$  – размерность системы уравнений элементов данного типа;  $A_i$  – вектор коэффициентов, описывающих физические, геометрические и конструктивные параметры технологических элементов технической системы;  $i$  – определяет номер технологического элемента, входящего в общее количество этапов, равное  $n$ .

Физический смысл переменных  $Z_j$ ,  $T_i$  характеризуется конкретным видом правых частей  $f_i, \dots, f_m$  и  $f_j, \dots, f_m$ . Функции, описывающие модели технологических процессов каждого этапа переработки волокнистой ленты могут быть представлены физическими моделями. Управление моделями (решением системы) можно определить путем генерирования внешних воздействий: сил



сопротивления, внешних нагрузок и т.п. Оптимизацию функционирования технологической машины в экспериментальных исследованиях проводят посредством воздействия на кинематические параметры машины при ее эксплуатации, где условия ограничений должны быть заданы функциями, аппроксимируемыми конечными дискретными значениями или имеющими определенный спектр.

Под параметрами модели технологической машины будем понимать элементы множества технологических, технических и физических характеристик, по которым можно установить их оптимальные величины, определяющие качество ее функционирования. Как показано в [1], параметры технической системы неравнозначны и разделяются на главный и основные. Под *главным параметром* будем понимать техническую величину как более полно отражающую потребительские свойства ленточной машины. Практикой установлено, что качество продукта (ленты, ровницы, пряжи) в наибольшей степени характеризуется равномерным распределением плотности волокнистого материала по его длине.

В тесной взаимосвязи с главным параметром находятся *основные параметры*, которые можно рассматривать как ограничения математической модели при оптимизации системы.

В общем виде уравнения параметров процесса функционирования сложной технической системы можно представить целевой функцией

$$\bar{Y} = \bar{Y}(\bar{F}, \bar{x}, \tau), \quad (13)$$

где  $\bar{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  – вектор выходных параметров объекта;

$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  – вектор конструктивных и кинематических параметров;

$\bar{F} = (f_1, f_2, \dots, f_m)$  – вектор воздействий (внешних и внутренних);

$\tau$  – аргумент времени.

Ограничения, накладываемые на конструктивные параметры, могут быть в виде уравнений или неравенств типа

$$\begin{aligned} \bar{g} &= (\bar{x}, \bar{F}, \bar{Y}, \tau) < 0 \\ \bar{g} &= (\bar{x}, \bar{F}, \bar{Y}, \tau) > 0 \end{aligned} \quad (14)$$

За информационный параметр качества волокнистой ленты принимается коэффициент вариации линейной плотности  $C_v$ . Это позволяет представить показатель качества ленты в виде целевой функции или вектором качества

$$\bar{C}_v = \bar{C}_v(\bar{x}) = (C_{v1}(\bar{x}), C_{v2}(\bar{x}), \dots, C_{vk}(\bar{x})), \quad (15)$$

где  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  – векторы варьируемых конструктивных параметров, обеспечивающих настройку системы (расстояния между рабочими органами, скорости их движения и т.п.), и параметры исходного продукта переработки (например, штапельная длина продукта).

В процессе получения требуемых значений настроечных параметров ленточной машины математическую модель можно представить в виде взаимодействия составляющих системы управления – регулирования с отрицательной обратной связью (структурная схема показана на рис. 2). На вход модели поступает заданный уровень функции качества  $\bar{C}_{v0}$  параметр плотности волокнистой ленты. Сравнение заданного уровня  $\bar{C}_{v0}$  с текущим значением функцией каче-

ства  $\bar{C}_v$  плотности волокнистой ленты вырабатывает величину рассогласования  $\Delta \bar{C}_v$ . Посредством метода варьирования параметров вычисляются новые значения  $\tilde{x} = (x'_1, x'_2, \dots, x'_k)$ . Значения  $\tilde{x}$  корректируются в соответствии с ограничениями, в результате получаем вектор  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ . В обратной связи математической модели, при полученных значениях составляющих вектора  $\bar{x}$ , решаются уравнения процесса функционирования объекта и проводится вычисление нового текущего значения  $\bar{C}_v$ .

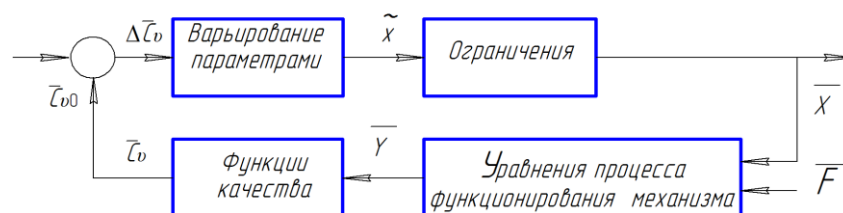


Рисунок 2 – Информационная модель объекта оптимизации технологического процесса

Факторы взаимодействия элементов машины с волокнистой лентой на всех технологических этапах разнообразны, откуда возникает задача многокритериальной оптимизации, и решаются методами выделения *основных критериев* на отдельных технологических процессах. Структурная схема информационной модели технологической машины обуславливает необходимость контролирующего элемента параметра качества продукции, что обеспечивает постоянное сравнение технологического результата с заданием качества продукта. Контроль волокнистой ленты в виде системы с распределенными параметрами рассмотрен в работе [3]. Фактором применимости в модели системы контроля являются условия его эксплуатации, выраженные в виде внешних возмущений.

#### Выводы:

- определена компоновочная схема модели технологической машины,
- определены главный и основные параметры модели их оптимизации,
- определен метод описания информационной модели технологической машины через ее технические и технологические параметры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К вопросу определения параметров технологического оборудования, конструируемого для пищевых производств / В.С. Николаев, А.Ф. Чамин, К.П. Фудин // Информационные технологии и системы в науке, образовании, промышленности : Сборник докладов Второй всероссийской науч.-технич. конференции / Под ред. В.Б. Моисеева [и др.]. – Пенза : Изд. Пенз. гос. технол. акад., 2009. – С. 261–268.
2. Повышение технической оснащенности ленточного оборудования / Бочков А.М., Николаев В.С., Исаев ВВ. // Прогрессивное технологическое оборудование в прядении натуральных и химических волокон : Тезисы докладов научно-технического семинара. – Пенза, 1991. – С. 23–25.
3. Моделирование волокнистой структуры в виде системы с распределенными параметрами / В.С. Николаев, В.А. Авроров, В.В. Волков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего <sup>плюс</sup> : Научное периодическое издание. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2013. – Выпуск № 06 (10). – С. 80–87. – ISSN 2221-951X. – (Технические науки. Пищевые производства).

УДК 004.92+621.9

# ИНТЕГРИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС КОМПЬЮТЕРНО-ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© *Р.Д. Прошина, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *Е.С. Прошина, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *Е.Н. Салмов, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

## INTEGRATED COMPLEX OF SIMULATION ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS

© *R.D. Proshina, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *E.A. Proshina, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *E.N. Salmov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

Рассматривается интегрированный электромеханический комплекс, обеспечивающий проведение научных исследований и профессиональную подготовку по множеству дисциплин специальности. Основан на интеграции всех видов учебной и научной деятельности вуза и сочетает в себе методы и методики автоматизированного исследования управляемых вентильно-электромеханических систем на математических и физических моделях.

**Ключевые слова:** автоматизация научных исследований, интегрированный электромеханический комплекс, лаборатория, модель, профессиональная подготовка, управление.

We consider the integrated electro-mechanical complex, providing holding scientific research and training in multiple disciplines of the specialty. Based on the integration of all types of educational and scientific activities of the university and combines methods and techniques of automated valve-controlled study of electromechanical systems for mathematical and physical models.

**Key words:** automation of scientific research, integrated electro-mechanical complex, laboratories, model, training, management.

**E-mail:** proshin.Ivan@inbox.ru

Структура интегрированного электромеханического комплекса (ИЭМК), представляющего собой многофункциональный объект исследований (МФО), основывается на концепции интегрированных комплексов сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) [1–3] с использованием виртуально-физической среды (рис. 1).

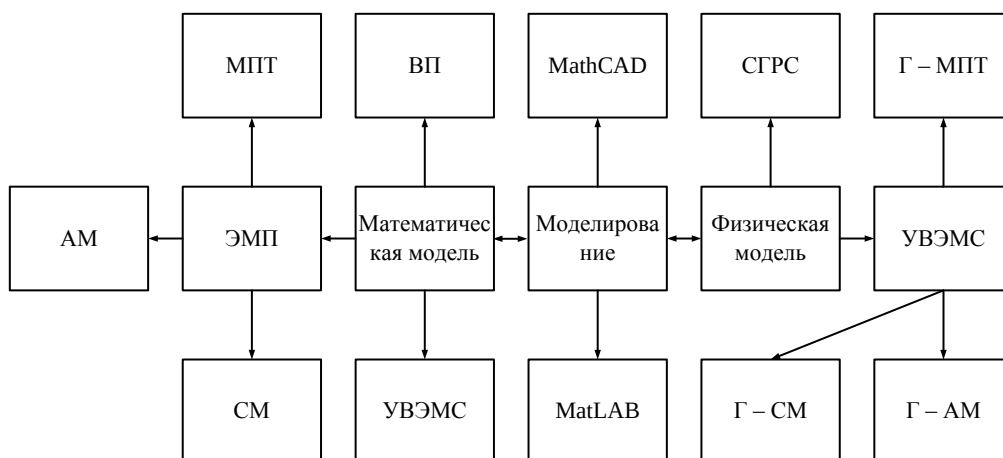


Рисунок 1 – Структура интегрированного электромеханического комплекса

ИЭМК объединяет совокупность технических, математических, программных и методических средств, обеспечивающих научные исследования и профессиональную подготовку по направлению “Автоматизация и управление” на базе концепции управления образовательным процессом по вектору знаний [3–5]. Базовые компоненты ИЭМК – модели: математические (ММ) и физические. Физические модели включают в себя установки с машинами постоянного тока (МПТ), асинхронными (АМ) и синхронными (СМ) машинами. Математические модели (рисунок 2) электромеханических систем строятся на базе теории обобщённого электромеханического преобразователя (ЭМП) в двухфазных системах координат:  $u, v, \alpha, \beta, d, q, x, y$ .

Математическое моделирование и экспериментальные исследования вентильных (ВП) и электромеханических преобразователей и систем на их основе – управляемых вентильно-электромеханических систем (УВЭМС) – проводятся на основе универсальной установки объединяющей системы “Г – МПТ”, “Г – АМ”, “Г – СМ”, которая включает в себя генератор постоянного тока и соответствующую машину. Предусмотрена возможность объединения всех систем с установкой “Синхронный генератор – распределённая электрическая сеть” (СГРС).

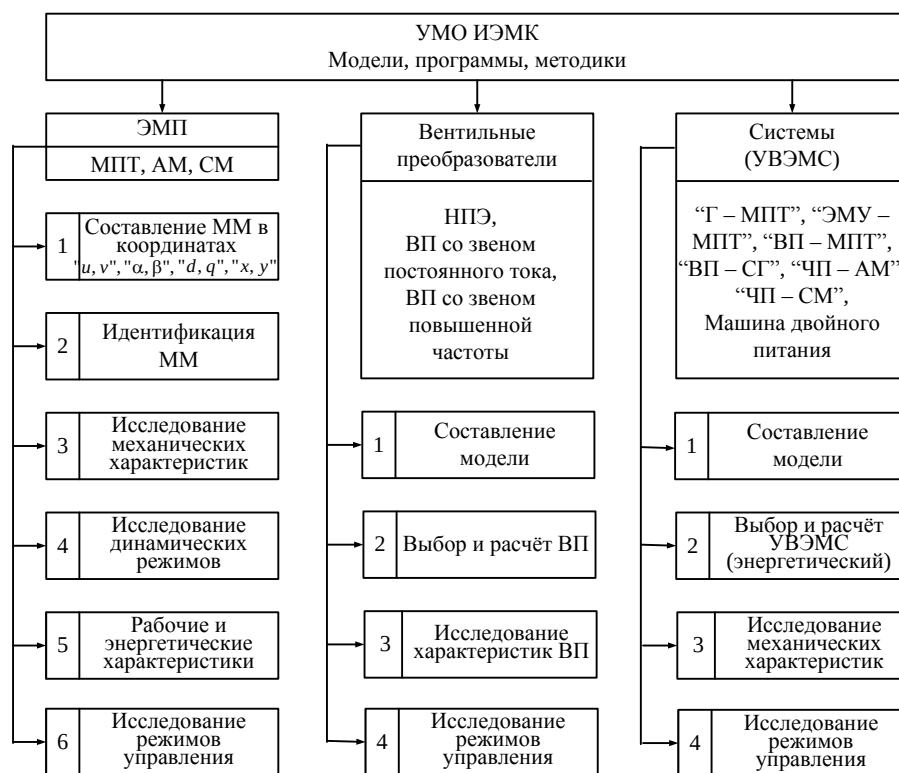


Рисунок 2 – Структура УМО ИЭМК

Базой математического моделирования являются разработанные математические модели УВЭМС и программы на их основе [6–9] с использованием специализированных пакетов Mathcad, Matlab.

ММ непосредственных преобразователей электроэнергии (НПЭ) строятся на основе разработанной концепции [6], суть которой состоит в представлении механизма управления НПЭ как процесса дискретного управления начальной фазой единственного гармонического колебания. Выходное напряжение  $U(\omega_2 t)$  каждой фазы НПЭ при этом рассматривается как единственное гармоническое ко-

ление с дискретно управляемой начальной фазой. Дискретность изменения фазы  $\Delta\varphi = 2\pi/m$  определяется эквивалентным количеством фаз входного напряжения  $m$ , участвующих в формировании каждой фазы выходного напряжения (количеством импульсов входного напряжения в периоде выходного).

Все возможные способы управления при этом задаются во времени  $t$  переключающей функцией амплитуды  $h_i^1[t]$  и фазы  $h_j^2[t]$ , а процедура преобразования электрической энергии  $n$ -фазного НПЭ при раздельном управлении описывается моделью

$$\begin{aligned} \bar{U}_2(\omega_2 t) &= \bar{H}^1[t] \cdot \bar{U}_1(\omega_1 t), \\ \bar{H}^1[t] &= \begin{bmatrix} h_{11}^1[t] & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_{22}^1[t] & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & h_{pp}^1[t] & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h_{nn}^1[t] \end{bmatrix}; \\ \bar{U}_1(\omega_1 t) &= U_m \begin{bmatrix} \sin(\omega_1 t + h_1^2[t] \cdot \Delta\varphi) \\ \sin(\omega_1 t + h_2^2[t] \cdot \Delta\varphi) \\ \dots \\ \sin(\omega_1 t + h_g^2[t] \cdot \Delta\varphi) \\ \dots \\ \sin(\omega_1 t + h_m^2[t] \cdot \Delta\varphi) \end{bmatrix}; \\ \bar{U}_2(\omega_2 t) &= \begin{bmatrix} U_1(\omega_2 t) \\ U_2(\omega_2 t) \\ \dots \\ U_p(\omega_2 t) \\ \dots \\ U_n(\omega_2 t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

На основе предложенной концепции введено понятие вектора фазового состояния (фазосмещения) (ФС), определяющего положение вектора выходного напряжения НПЭ на  $n$ -фазном симметричном ЭМП

$$\bar{\Theta}(t) = e^{j\bar{H}^2[t]\Delta\varphi}. \quad (2)$$

Для НПЭ с однократной модуляцией (ОМ) переключающие функции в каждой фазе взаимосвязаны и равны

$$\bar{H}_B^2[t] = \bar{H}_A^2[t] + m/n; \quad \bar{H}_C^2[t] = \bar{H}_A^2[t] + 2m/n. \quad (3)$$

Следовательно, задание всех управляющих воздействий в этих НПЭ возможно заданием закона изменения одной ПФ фазы. Выходное напряжение НПЭ представлено в виде произведения ПФ амплитуды,  $m$ -мерного вектора гармонического колебания  $\bar{S}(\omega_1 t) = U_m e^{j\omega_1 t}$  и вектора ФС, т.е.

$$U(\omega_2 t) = \bar{H}^{-1}[t] S(\omega_1 t) \bar{\Theta}(t). \quad (4)$$

В случае трёхфазного выхода в соответствии с предложенной концепцией НПЭ любой сложности, независимо от количества фаз  $m$  входного напряжения  $U(\omega_1 t)$ , принципов и способов управления, может быть задан минимальным количеством структур, соответствующих количеству возможных состояний тиристорного коммутатора:  $ABC$  – ПЭ во всех фазах ( $A, B, C$ ) включены;  $\bar{A}BC$  – отключены ПЭ в фазе  $A$ ;  $A\bar{B}C$  – отключены ПЭ в фазе  $B$ ;  $AB\bar{C}$  – отключены ПЭ в фазе  $C$ ;  $\bar{A}\bar{B}\bar{C}$  – отключены ПЭ в фазах  $A, B, C$ . Введён оператор поворота

$$w = \begin{cases} -1 & \text{при повороте вектора напряжения на } -2\pi/3; \\ 0 & \text{при нулевом повороте; повороте вектора напряжения на } +2\pi/3. \end{cases} \quad (5)$$

На базе теории обобщённого ЭМП, предложенной концепции и ММ НПЭ разработан математический аппарат решения задач анализа, синтеза и моделирования управляемых ВЭМС с НПЭ. При представлении ММ ЭМП в двухфазной системе координат  $\alpha, \beta$  напряжения, синтезируемые НПЭ, также должны быть приведены к общей системе координат.

При заданных значениях переменных  $x_\alpha, x_\beta$  с учётом введённого оператора поворота  $W$  значения переменных  $x'_\alpha, x'_\beta$  в новой системе координат могут быть вычислены так:

$$\begin{bmatrix} x'_\alpha \\ x'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5 & -w\sqrt{3}/2 \\ w\sqrt{3}/2 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}. \quad (6)$$

При переключениях НПЭ имеет мгновенную несимметрию. Следовательно, его моделирование целесообразно проводить в трёхфазной системе координат, но это требует пересчёта значений переменных из трёхфазной системы координат в двухфазную и обратно. Для обобщённой записи такого перехода введены множители  $K_A, K_B, K_C$ , равные единице при совмещении соответствующей фазы  $A, B$  или  $C$  с осью  $\alpha$ , и – нулю в противном случае. Введём матрицы перехода от трёхфазной системы координат к двухфазной и обратно

$$P_{23} = \begin{bmatrix} K_A & K_B & K_C \\ \frac{(K_C - K_B)}{\sqrt{3}} & \frac{(K_A - K_C)}{\sqrt{3}} & \frac{(K_B - K_A)}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}; \quad P_{32} = \begin{bmatrix} K_A & K_B & K_C \\ K_C & K_A & K_B \\ K_B & K_C & K_A \end{bmatrix}.$$

Тогда для перехода из трёхфазной системы координат в двухфазную получим

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = P_{23} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}. \quad (7)$$

При обратном переходе значения переменных в трёхфазной системе координат  $x_a, x_b, x_c$  находятся из системы уравнений

$$P_{32} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0.5 & \sqrt{3}/2 \\ -0.5 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Проведено обобщение и разработка ММ управляемых ВЭМС на базе машин постоянного тока, синхронных и асинхронных машин [7].

Задание переключающей функции  $h_j^2[t]$  для НПЭ с ОМ определяется его характерной особенностью, состоящей в постоянстве шага переключения переключающих элементов НПЭ. Моделирование этих систем обеспечивается заданием цикла переключения  $n1$  и количества фаз входного напряжения, участвующих в формировании каждой фазы выходного напряжения. Мгновенное значение фазы входного гармонического колебания  $\omega_1 t$  в момент коммутации изменяется на величину дискретности изменения начальной фазы  $\Delta\varphi = 2\pi/m$ .

На рис. 3–5 в качестве примера приведены результаты моделирования с использованием (1) – (9) системы «НПЭ – АМ» с ОМ.

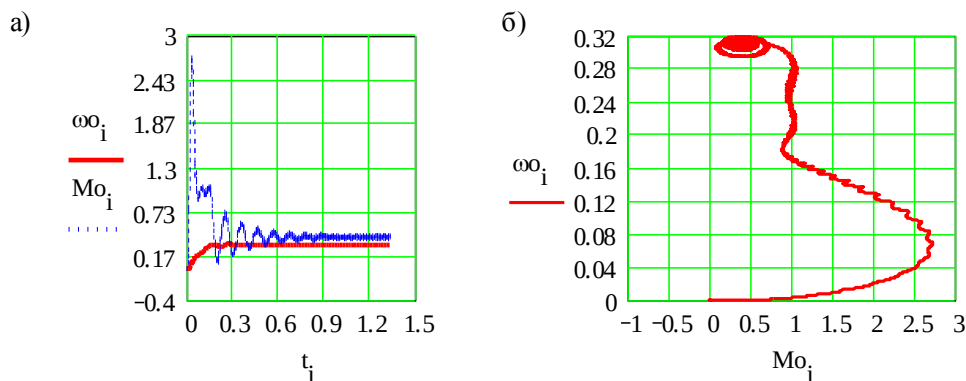


Рисунок 3 – Переходная характеристика момента и скорости (а), динамическая механическая характеристика (б) системы «НПЭ – АМ» при ОМ  $n1 = 45$  ( $m = 6$ ) при  $f_2 = 16,667$  Гц, двигатель АО2 – 31 – 4

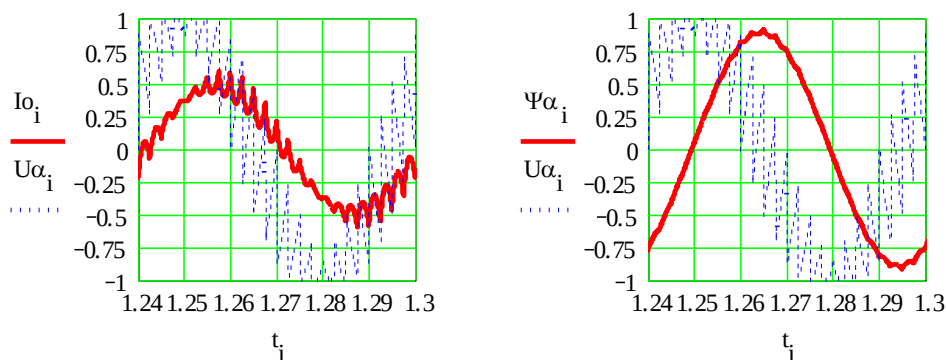


Рисунок 4 – Зависимости напряжения  $U_\alpha$ , тока  $I_o$ , потокосцепления  $\Psi_\alpha$  от времени  $n1 = 45$  ( $m = 6$ ),  $f_2 = 16,667$  Гц, двигатель АО2 – 31 – 4

Взаимосвязь параметров НПЭ при заданных количествах шагов  $N$  на периоде  $T_1$  входного  $m$ -фазного напряжения и  $n1$  в цикле переключения переключающей функции фазы  $h_j^2[t]$  с дискретностью  $\Delta\varphi$  определяется формулами:

$$n1 = \frac{N}{m} \frac{f_1}{f_2 \pm f_1}; \quad f_2 = \frac{N \mp n1 \cdot m}{m \cdot n1} \cdot f_1; \quad k_f = \frac{f_1}{f_2} = \frac{m \cdot n1}{N \mp n1 \cdot m}. \quad (9)$$

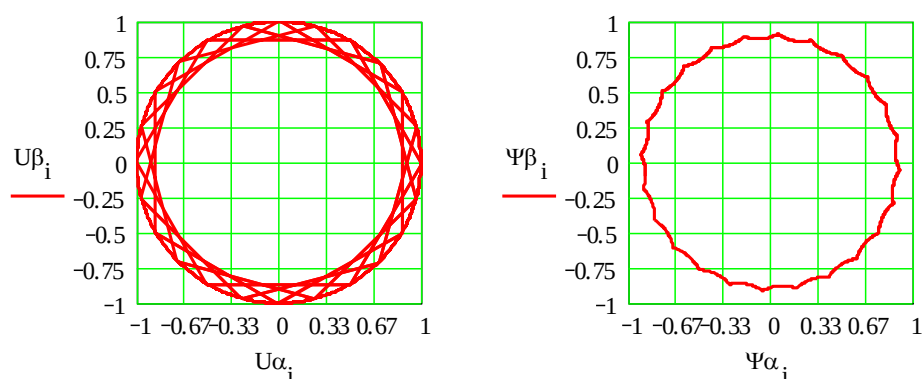


Рисунок 5 – Годографы напряжений  $U$  и потокоцеплений  $\Psi$  статора  $n_1 = 45$  ( $m = 6$ ),  $f_2 = 16,667$  Гц, двигатель АО2 – 31 – 4

Для управления экспериментальной установкой по исследованию УВЭМС на базе машины постоянного тока разработана система управления, конструктивные особенности которой отражает рис. 6.



Рисунок 6 – Система управления электромеханической установкой с машинами постоянного тока

Таким образом, совокупность разработанных математических моделей, программных средств, экспериментальных установок, методического обеспечения по исследованию ЭМП, вентильных преобразователей и управляемых вентильно-электромеханических систем на их основе образует интегрированный электромеханический комплекс – элемент ИКСАЛ, обеспечивающий научные и учебные исследования УВЭМС.

На основе ИЭМК интегрируются в единую систему курсы: “Введение в специальность”, “Основы инженерного творчества”, “Физика”, “Электротехника”, “Электромеханика”, “Управляемые вентильно-электромеханические системы”, “Математические основы управления”, “Теория автоматического управления”, “Технические средства автоматизации”, “Автоматизированный электропривод”, “Моделирование систем управления”, “Переходные процессы в электрических системах”, “Автоматизация оперативных процессов в энергосистемах”, “Автоматизированные системы учёта энергии и мощности в энергосистемах”, “Технические измерения и приборы” и многие другие.



Создание интегрированного электромеханического комплекса – многофункционального объекта ИКСАЛ – направлено на переход от специализированных лабораторий по отдельным дисциплинам к интегрированным системам специальности или комплекса специальностей по всем видам научной и учебной деятельности на всех уровнях профессиональной подготовки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Концепция построения интегрированных комплексов сетевых автоматизированных лабораторий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 5(2). – С. 527–530.
2. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Программная платформа для построения интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – Т. 11. – № 5–2. – С. 531–536.
3. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д. Интегрированный электромеханический комплекс // В мире научных открытий. – 2010. – № 4–8. – С. 27–30.
4. Прошин Д.И. Подготовка высококвалифицированных кадров для предприятий машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. № 1–3. – С. 727–731.
5. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д., Сюлин П.В. Управление образовательным процессом подготовки кадров для машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. № 1(2). – С. 705–708.
6. Прошин И.А. Управление в вентильно-электромеханических системах. – Кн. 1. Управление непосредственными преобразователями электрической энергии. – Пенза: ПТИ, 2002. – 333 с.
7. Прошин И.А. Управление в вентильно-электромеханических системах. – Кн. 2. Математическое моделирование вентильно-электромеханических систем. – Пенза : ПТИ, 2003. – 306 с.
8. Прошин И.А. Управление в вентильно-электромеханических системах. – Кн. 3. Синтез управляемых вентильно-электромеханических систем. – Пенза : ПТИ, 2003. – 320 с.
9. Прошин И.А., Бурков В.В., Кутузов Е.А., Усманов В.В. Программное средство “НПЭ – АД” для исследования вентильно-электромеханических систем с асинхронным электродвигателем (Пакет расширения к системе Matlab 6.0). Заявка № 2004610841. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 4-го июня 2004 года.

УДК 351.864.2

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО  
УДАРНИКА И ПРЕГРАДЫ**

© *М.В. Колодяжный, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)*

© *Ю.Н. Косенок, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)*

**THE ANALYTICAL MODEL OF SHOCK WAVE INTERACTION PROCESS  
HIGH-SPEED HAMMER AND HEDGES**

© *M.V. Kolodyazhny, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *Y.N. Kosenok, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В настоящее время нет корректного выражения для расчета бронепробиваемости, которое было бы пригодно для всех видов разрушения преград. Предпочтение отдано прямой опытной проверке – стрельбой, ударом. Но опытные проверки по всей совокупности требуют значительной затраты средств и времени, а дают, в основном, лишь сравнительные оценки. Поэтому даже весьма упрощенная математическая модель, идентифицированная по опытам, может помочь более широкой оценке средств индивидуальной бронезащиты, и особенно – для прогнозной оценки последствий динамических воздействий на человека.

**Ключевые слова:** стрелковое оружие, средства индивидуальной бронезащиты, ударно-волновой процесс, ударник.

Currently, there is no correct expression for calculating armor penetration, which would be suitable for all types of destruction obstacles. Preference is given to direct experimental verification – shooting, hit. However, experimental test for the totality require considerable cost and time, and provide primarily a comparative evaluation. Therefore, even a very simplified mathematical model, identified by experiments, can help a broader assessment of body armor, and especially – for the prognostic assessment of dynamic effects of human exposure.

**Key words:** small arms, body armor, shock-wave process, striking member

**E-mail:** Kolodaj@rambler.ru

Стрелковое оружие (СО) является основным средством борьбы с живой силой противника в ближнем бою. Никакие альтернативные средства поражения живых целей в обозримом будущем по эффективности стрельбы, весовой нагрузке на военнослужащих, маневренности, экономичности производства не способны заменить современное, постоянно совершенствуемое СО и боеприпасы к нему.

Появление новых и совершенствование существующих средств бронезащиты, в том числе и средств индивидуальной бронезащиты (СИБ) личного состава, порождают, с одной стороны, необходимость модернизации средств поражения, с другой стороны, развитие средств поражения стимулирует конструкторов и учёных к созданию новых преград. Это особенно актуально в последнее десятилетие, когда на передний план выступают локальные военные конфликты, многочисленные террористические акции, при этом роль боеприпасов СО и индивидуальной экипировки подразделений специального назначения возрастает. При разработке боеприпасов, поражающие элементы которых взаимодействуют с преградами с различными скоростями, необходимо учитывать физико-механические свойства материалов пули и преграды, их ударно-волновой характер, взаимодействие и пр. [1]. В прикладном плане на этапе проектирования актуальны как задачи по предварительному выбору оптимальных параметров пули, так и задачи по прогнозной оценке защитных свойств различных вариантов СИБ личного состава.

Процесс проникания пули в преграду представляет собой чрезвычайно сложное физическое явление, особенно при пробитии преграды, когда бронепробиваемость определяется не только видом деформации пули (упругая, пластическое течение), но и характером разрушения преграды (прокол, откол, пробка). При ударе высокоскоростного ударника (пули, осколка) о преграду при скорости соударения до 1,5 км/с возникают следующие процессы:

- локальная упруго-пластическая деформация ударника и преграды с образованием каверны;
- разогрев ударника и местный разогрев или оплавление преграды;
- при достаточной энергии ударника – пробитие преграды с её разрушением или без разрушения («пробкой»);
- перемещение ударника вместе с преградой в области ударного контакта до выбора зазора преграды с телом человека;
- передача ударно-волнового импульса телу человека;
- возникновение и распространение ударной волны напряжения в преграде и в теле человека [1].

К настоящему времени не определено корректное выражение для расчета бронепробиваемости, которое было бы пригодно во всем диапазоне скоростей встречи и для всех видов разрушения преград. Стандартизованных методик расчета бронепробиваемости также не существует, лишь определены величины, от которых зависят процессы «высокоскоростного» удара. Ниже перечислены эти величины, причём относящиеся к ударнику снабжены индексом «1», а относящиеся к преграде – индексом «2»:

$d_1, k_{\phi 1}, V_c$  – диаметр, коэффициент формы и скорость ударника в начальный момент контакта с преградой;

$\ell_1, \ell_2$  – длина ударника и глубина его внедрения в преграду;

$\rho_1, \rho_2$  – плотность материала ударника и преграды;

$H_1, H_2$  – динамическая твёрдость ударника и преграды;

$a_1, a_2$  – скорость звука в материале ударника и преграды;

$b_1, b_2$  – ударные константы материала ударника и преграды, определяе-

мые по ударной адиабате ( $b = \frac{p}{\rho U^2} - \frac{a}{U}$ ).

Этот состав определяет величину контактной силы (силы сопротивления преграды). Для упорядочения состава вышеуказанных величин использована П-теорема теории размерностей и составлена система безразмерных параметров [2]. В результате получено выражение для контактной силы, аналогичное выражению силы сопротивления воздуха, принятому во внешней баллистике:

$$R(x) = C_R(x) \frac{\rho_1 V^2}{2} S_M, \quad (1)$$

$$C_R(x) = \frac{8}{\pi} f\{\lambda_1, k_{\phi 1}, \frac{H_1}{\rho_1 V_1^2}, \sqrt{\frac{\rho_1}{H_1}} a_1, b_1, \frac{\rho_2}{\rho_1}, \frac{H_2}{H_1}, \frac{a_2}{a_1}, b_2\}, \quad (2)$$

где  $C_R(x)$  – коэффициент сопротивления преграды;

$S_M$  – площадь мишени ударника;

$x$  – путь ударника в преграде;

$\lambda_1$  – удлинение ударника,  $\lambda_1 = \ell_1 / d_1$ ;

$k_{\phi 1}$  – коэффициент формы ударника,  $k_{\phi 1} = \sin^2 \frac{\alpha_1}{2}$  ( $\alpha_1$  – угол раствора (заострения)).

При скорости подхода ударника меньше 1,5 км/с можно принять допущение об отсутствии больших тепловых потерь. Тогда движение ударника в преграде определяется уравнением

$$V \frac{d(MV)}{dx} = -C_R \frac{\rho S_M}{2} V^2, \quad (3)$$

где  $M$  – совместная масса ударника и присоединенной части преграды, то есть  $M = m_1 + m_2(x)$ .

Скорость внедрения ударника в преграду определяется из (3):

$$V = V_c \exp\left[-\frac{\rho S_M}{2} \int_0^x \frac{(C_R(x) + \frac{2}{\rho S_M} \frac{dm_2}{dx})}{M(x)} dx\right]. \quad (4)$$

Интеграл в правой части полученной зависимости требует учёта волновых процессов, так как предположительно, что полная длительность удара в четыре и более раз не превышает время пробега волны напряжения [3].

Проверим высказанное предположение путем несложных вычислений.

Заменим, в первом приближении, интеграл в (4) постоянным значением; т.е. положим  $V \approx V_c \exp[-k_R x]$  и определим время удара. Представив преграду пластиной толщиной  $h$ , определим время по приближённой зависимости

$$T_k = \frac{k x_k^2}{V_c (1 - e^{-k_r x_k})}. \quad (5)$$

Результаты вычислений для пластины толщиной 3 мм даны в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные значения времени взаимодействия ударника с преградой ( $T$ , мксек)

| Условия ударного взаимодействия   |                       |                     | Скорость соударения ударника ( $V_c$ , м/с) |     |     |     |     |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Результат ударного взаимодействия | Соотношение $V_k/V_c$ | Соотношение $x_k/n$ | 50                                          | 100 | 200 | 400 | 800 |
| Непробитие                        | 0                     | 0,8                 | 336                                         | 168 | 84  | 42  | 21  |
| Критическая стойкость             | 0                     | 0.99                | 416                                         | 208 | 104 | 52  | 26  |
| Пробитие                          | 0,05                  | 1                   | 189                                         | 95  | 46  | 23  | 12  |
| Пробитие                          | 0,25                  | 1                   | 110                                         | 55  | 28  | 14  | 7   |

Скорость распространения волны напряжения в пластине определяется как

$$C_L \cong \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}. \quad (6)$$

Для стали, алюминия, стекла  $C_L \cong 5400$  м/с. Тогда, например, для стекловолоконного материала можно принять ту же скорость (при допущении об изотропности). Время пробега волны в радиусе  $\sim 0,2$  м составит

$$t_L \cong \frac{0,2}{5400} \approx 40 \text{ мксек}.$$

Из сравнения  $4t_L \sim 160$  мксек со значениями  $T_k$  из табл. 1 видно, что при скорости подхода ударника более 50 м/с волновым процессом пренебрегать нельзя, т.е. высказанное предположение подтверждается.

Таким образом, представлен подход по аналитическому моделированию ударно-волнового процесса взаимодействия высокоскоростного ударника и преграды.

Следует заметить, что аналитическое описание волновых процессов в вязко-упругих телах ограниченных размеров, каковыми являются компоненты СИБ, чрезвычайно сложно. Необходимо учитывать конфигурацию и размеры тела, слоистую структуру материала, спутные и отраженные волны, внутреннее трение, тепловые явления и многое другое. Поэтому в инженерную практику пока широко не внедрены математические модели проникания ударника в преграду. Предпочтение отдано прямой опытной проверке – стрельбой, ударом. Но опытные проверки по всей совокупности требуют значительной затраты средств и времени, а дают, в основном, лишь сравнительные оценки. Поэтому даже весьма упрощенная математическая модель, но идентифицированная по опытам, может помочь более широкой оценке СИБ, и особенно – для прогнозной оценки последствий динамических воздействий на человека. В последнем случае необходимо учитывать и моделировать высокочастотный и низкочастотный импульсы ударного давления, которые образуются, соответственно, от удара пули по защите СИБ и от удара защиты СИБ по мягким тканям человека [4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. *Исследования ударных процессов*. – М. : Машиностроение, 1977. – 240 с.
2. Седов Л.И. *Методы подобия и размерности*. – М. : Наука, 1984. – 316 с.
3. Кильчевский Н.А. *Теория соударений твёрдых тел*. – Киев : Наукова думка, 1979. – 246 с.
4. Косенок Ю.Н. *О влиянии состава защитной композиции бронежилета на тяжесть контузионных повреждений для различных ударников // Материалы межвузовской НТК ПАИИ*. – Пенза : ПАИИ, 2008.

УДК 004.942+532

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИНТЕГРИРОВАННОМ КОМПЛЕКСЕ СЕТЕВЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

- © **Д.И. Прошин**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Е.А. Данишкина**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Н.Н. Короткова**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

#### MATHEMATICAL MODELING OF HYDROMECHANICAL PROCESSES IN INTEGRATED COMPLEX OF NET COMPUTER- AIDED LABORATORIES

- © **D.I. Proshin**, Penza State Technological University (Penza, Russia)
- © **E.A. Danishkina**, Penza State Technological University (Penza, Russia)
- © **N.N. Korotkova**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В статье разработан комплекс компьютерно-имитационного моделирования системы резервуаров в виртуально-физической среде, для которого построены математические модели в пространстве состояний. Приведены результаты моделирования, отражающие возможности проведения исследований гидромеханических объектов в условиях интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий.

**Ключевые слова:** методика, модель, математическое моделирование, технологические процессы.

A complex of computer simulated modeling of some storage system in virtual physical medium is developed in the article. Mathematical patterns in space – state form for it are built. Some results of modeling showing the opportunities to carry out research of hydromechanical objects in integrated complex of net computer-aided laboratories.

**Key words:** procedure, pattern, mathematical modeling, technological processes.

**E-mail:** proshin.Ivan@inbox.ru

Цель настоящей работы – разработка единой системы компьютерно-имитационного моделирования технологических процессов для проведения учебных и научных исследований как составной части интегрированной системы моделирования объектов в пространстве компонент вектора знаний [1–3] по направлению или по специальности.

Для проведения комплексных исследований технологических процессов в интегрированном комплексе сетевых автоматизированных лабораторий (ИКСАЛ) разработан многофункциональный объект исследования технологических процессов, обеспечивающий физическое моделирование гидромеханических и тепловых процессов теплоэнергетики и машиностроения (рис. 1).

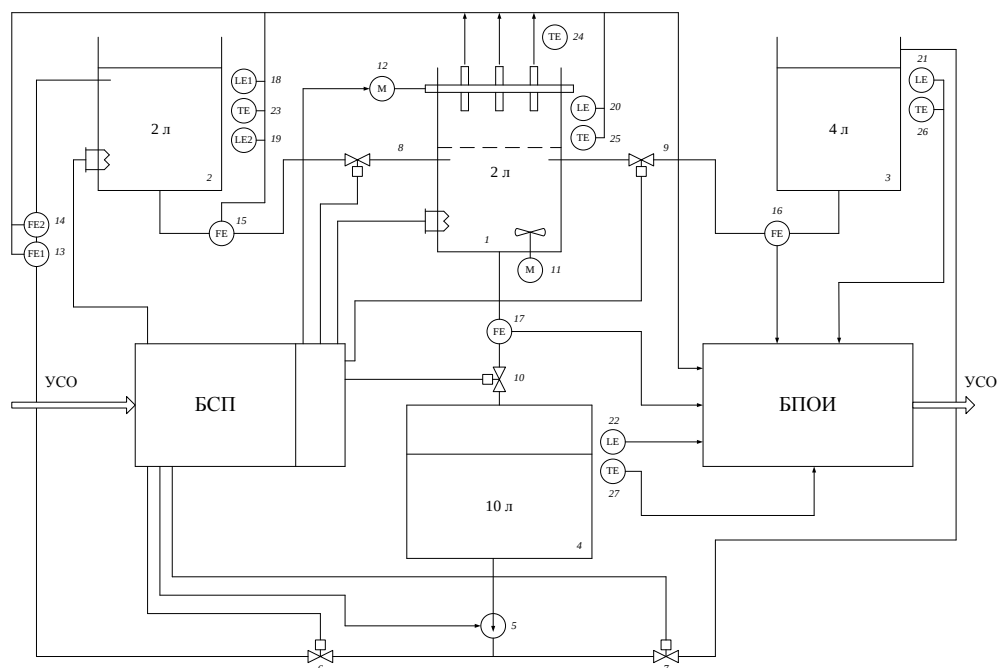


Рисунок 1 – Структура многофункционального объекта исследования технологических процессов

Основу многофункционального объекта составляет система резервуаров с жидкостью, блок силовых преобразователей БСП, блок первичной обработки информации БПОИ, датчики расхода FE, LE, TE, вентили 1–9, двигатели М 11 и 12.

Для исследования тепловых процессов в системе использованы нагреватели. Перераспределение жидкости между резервуарами обеспечивается насосом 5.

Проведение исследований на экспериментальных установках в ИКСАЛ сочетается с математическим моделированием. Цель исследования гидромеханических технологических объектов управления – моделирование объектов для всевозможных сочетаний включения и взаимосвязи резервуаров с жидкостью

при различных условиях отвода жидкости. Моделируются следующие объекты управления (рис. 2).

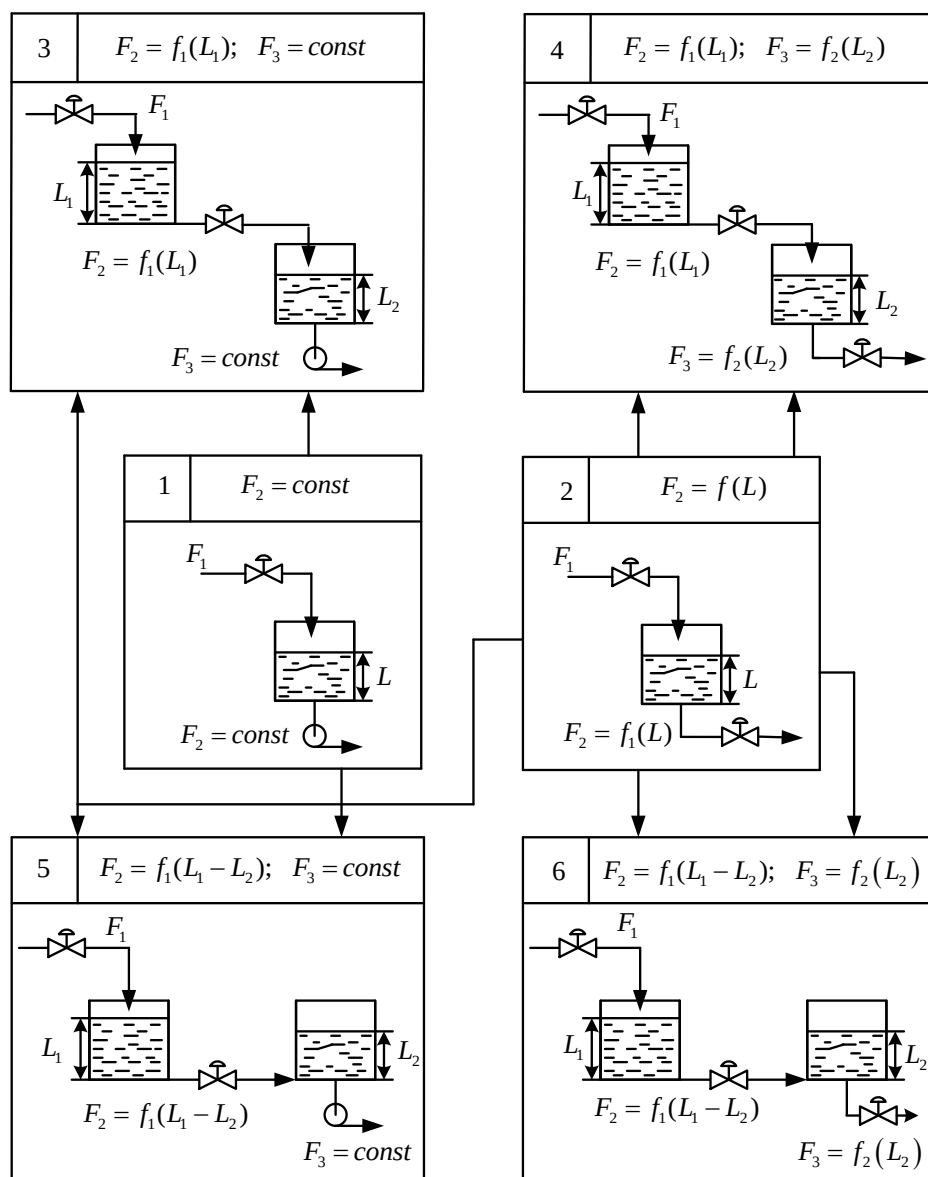


Рисунок 2 – Варианты систем резервуаров

1. Резервуар с жидкостью при откачивании жидкости с постоянным объёмным расходом.

Резервуар с жидкостью при вытекании жидкости самотёком.

Система двух последовательно включенных резервуаров при вытекании жидкости из первого резервуара самотёком, из второго – с постоянным объёмным расходом.

Система двух последовательно включенных резервуаров при вытекании жидкости из обоих резервуаров самотёком.

Система двух последовательно включенных и взаимосвязанных по уровню резервуаров, установленных на одинаковой высоте, при вытекании жидкости из первого резервуара самотёком, из второго – с постоянным объёмным расходом.

Система двух последовательно включенных и взаимосвязанных по уровню резервуаров, установленных на одинаковой высоте при вытекании жидкости из обоих резервуаров самотёком.

Исследования гидромеханических технологических объектов управления включают в себя решение следующих задач.

1. Анализ технологической схемы и принципа действия ТОУ (принципиальной).

2. Анализ ТОУ как объекта управления.

3. Составление нелинейных математических моделей в абсолютных величинах.

4. Построение структурных схем нелинейных математических моделей в абсолютных величинах.

5. Составление математической модели статики. Расчёт статического режима.

6. Составление нелинейных математических моделей в относительных величинах.

Построение структурных схем нелинейных математических моделей в относительных величинах.

Линеаризация и построение линейных математических моделей ТОУ.

Преобразование математических моделей в пространстве состояний к математическим моделям “Вход – выход”.

Моделирование технологических объектов управления (ТОУ) на компьютерах.

Анализ результатов моделирования ТОУ. Выводы.

Технологический объект управления представляет собой систему двух резервуаров с жидкостью (рис. 2). В первый цилиндрический сосуд диаметром  $D_1$  и площадью сечения  $A_1$  жидкость подаётся через вентиль с проходным сечением  $A_{в1}$  и коэффициентом расхода вентиль  $\alpha_{в1}$ . Приток жидкости в первый резервуар осуществляется с объёмным расходом  $F_1$ .

Во второй цилиндрический резервуар диаметром  $D_2$  и площадью сечения  $A_2$  жидкость из первого резервуара поступает с расходом  $F_2$  под действием давления столба жидкости через вентиль с проходным сечением  $A_{в2}$  и коэффициентом расхода вентиль  $\alpha_{в2}$ . Для третьей системы жидкость из второго резервуара вытекает под действием насоса, откачивающего жидкость с постоянной производительностью,  $F_3 = \text{const}$ , для четвёртого варианта – самотёком.

Варианты систем 5 и 6 аналогичны, соответственно, третьему и четвёртому вариантам, отличаясь от последних установкой резервуаров на одном уровне. Обозначения переменных в моделях резервуаров с жидкостью приведены в табл. 1.



Таблица 1 – Входные и выходные переменные модели системы двух резервуаров

| Наименование переменной                                                                                                       | Абсолютная величина                                                                    | Единица измерения     | Относительная величина                                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Объёмный расход жидкости:<br>1) на входе<br>– первого резервуара,<br>– второго резервуара,<br>2) на выходе второго резервуара | $F_1 = F_{10} + F_{10}y_1$<br>$F_2 = F_{20} + F_{20}y_2$<br>$F_3 = F_{30} + F_{30}y_3$ | $\text{м}^3/\text{с}$ | $y_1 = \frac{F_1 - F_{10}}{F_{10}}$<br>$y_2 = \frac{F_2 - F_{20}}{F_{20}}$<br>$y_3 = \frac{F_3 - F_{30}}{F_{30}}$ |
| Уровень жидкости:<br>– в первом резервуаре<br>– во втором резервуаре                                                          | $L_1 = L_{10} + L_{10}x_1$<br>$L_2 = L_{20} + L_{20}x_2$                               | $\text{м}$            | $x_1 = \frac{L_1 - L_{10}}{L_{10}}$<br>$x_2 = \frac{L_2 - L_{20}}{L_{20}}$                                        |

Нелинейные математические модели систем (рис. 2), соответственно, в абсолютных и относительных величинах принимают следующий вид.

Для системы 3:

$$\begin{bmatrix} \frac{dL_1}{dt} \\ \frac{dL_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha_{b_2} A_{b_2} \sqrt{2g} \sqrt{L_1}}{A_1} \\ \frac{\alpha_{b_2} A_{b_2} \sqrt{2g} \sqrt{L_1}}{A_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{A_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_3 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} \sqrt{(1+v_1)} \\ \frac{1}{T_2} \sqrt{(1+v_1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (1+y_1) \\ (1+y_3) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для системы 4:

$$\begin{bmatrix} \frac{dL_1}{dt} \\ \frac{dL_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha_{b_2} A_{b_2} \sqrt{2g} \sqrt{L_1}}{A_1} \\ \frac{\alpha_{b_2} A_{b_2} \sqrt{2g} \sqrt{L_1}}{A_2} - \frac{\alpha_{b_3} A_{b_3} \sqrt{2g} \sqrt{L_2}}{A_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot F_1; \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} (1+y_1) - \frac{1}{T_1} \sqrt{(1+v_1)} \\ \frac{1}{T_2} \sqrt{(1+v_1)} - \frac{1}{T_2} \sqrt{(1+v_2)} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для системы 5:

$$\begin{bmatrix} \frac{dL_1}{dt} \\ \frac{dL_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha_{b_2} A_{b_2} \sqrt{2g} \sqrt{L_1 - L_2}}{A_1} \\ \frac{\alpha_{b_2} A_{b_2} \sqrt{2g} \sqrt{L_1 - L_2}}{A_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{A_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1 \\ F_3 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1}(1+y_1) - \frac{1}{T_1\sqrt{L_{10}-L_{20_1}}} \sqrt{L_{10}(1+v_1)-L_{20}(1+v_2)} \\ \frac{1}{T_2\sqrt{L_{10}-L_{20_1}}} \sqrt{L_{10}(1+v_1)-L_{20}(1+v_2)} - \frac{1}{T_2}(1+y_3) \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для системы 6:

$$\begin{bmatrix} \frac{dL_1}{dt} \\ \frac{dL_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha_{b_2}A_{b_2}\sqrt{2g}\sqrt{L_1-L_2}}{A_1} \\ \frac{\alpha_{b_2}A_{b_2}\sqrt{2g}\sqrt{L_1-L_2}}{A_2} - \frac{\alpha_{b_3}A_{b_3}\sqrt{2g}\sqrt{L_2}}{A_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot F_1;$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1}(1+y_1) - \frac{1}{T_1\sqrt{L_{10}-L_{20_1}}} \sqrt{L_{10}(1+v_1)-L_{20}(1+v_2)} \\ \frac{1}{T_2\sqrt{L_{10}-L_{20_1}}} \sqrt{L_{10}(1+v_1)-L_{20}(1+v_2)} - \frac{1}{T_2}\sqrt{1+v_2} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В результате линеаризации математические модели (1) – (8) приводятся к линейным моделям в пространстве состояний в физических переменных.

Система 3:

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 \\ \frac{1}{T_2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_1}{T_1} & 0 \\ 0 & -\frac{K_2}{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Система 4:

$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 \\ \frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_1}{T_1} \\ 0 \end{bmatrix} y_1; \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Система 5:

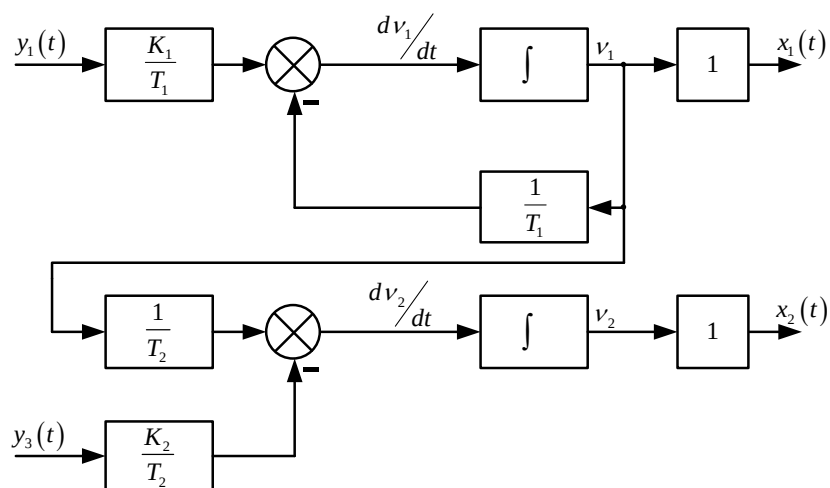
$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & \frac{K_2}{T_1} \\ \frac{K_3}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_1}{T_1} & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Система 6:

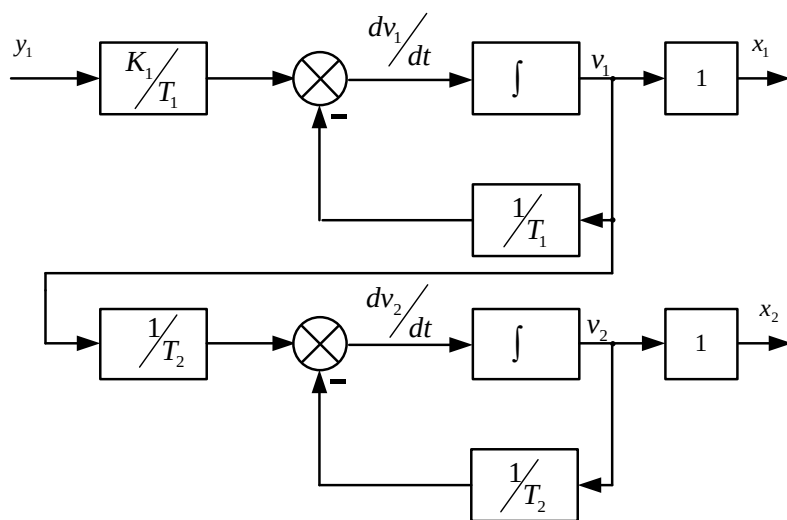
$$\begin{bmatrix} \frac{dv_1}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & \frac{K_2}{T_1} \\ \frac{1}{T_2} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_1}{T_1} \\ 0 \end{bmatrix} y_1; \quad \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

На рис. 3 приведены структурные схемы моделей (9) и (10).

Схемы моделей отражают последовательное соединение двух звеньев и по структуре близки к моделям в форме простых множителей.



а)



б)

Рисунок 3 – Структурные схемы систем 3 (а) и 4 (б)

Отличительная особенность структурных схем моделей (11) и (12), представленных на рис. 4, – наличие положительной обратной связи по второй координате состояния, отражающей взаимосвязь уровней жидкости в резервуарах.

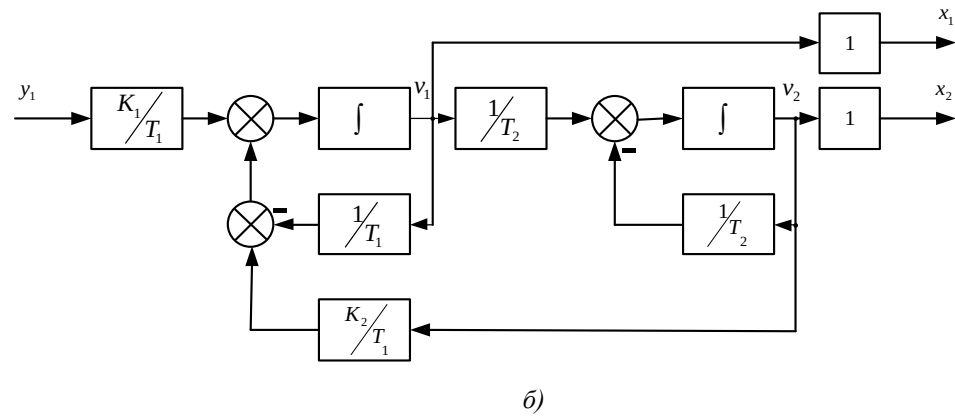
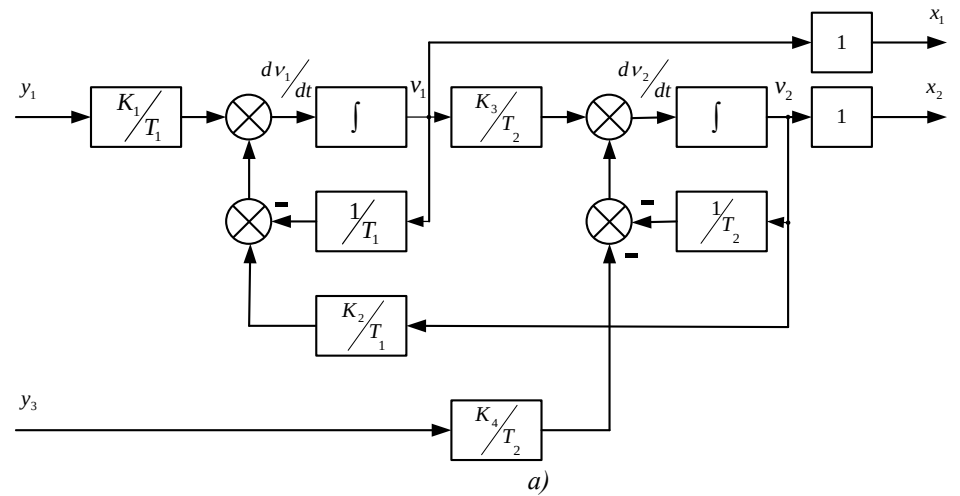


Рисунок 4 – Структурные схемы систем 5 (а) и 6 (б)

Графики переходных характеристик для рассмотренных вариантов систем резервуаров, рассчитанных по линейным математическим моделям, показаны на рис. 6,а–г. На рисунке 6,д показаны графики переходных характеристик уровней в резервуарах для системы 6, рассчитанные по нелинейным и линеаризованным моделям. Зависимости погрешностей моделирования относительно установившегося отклонения уровня  $\delta L$  и относительно абсолютного значения уровня  $\delta x$  в функции отклонения входного воздействия (расхода жидкости) отражает рисунок 6,е. Погрешность моделирования с использованием линеаризованных моделей при отклонениях входных воздействий в пределах 20 % по отношению к установившемуся отклонению уровня не превышает 10 %, а по отношению к абсолютному значению уровня – 3 %.

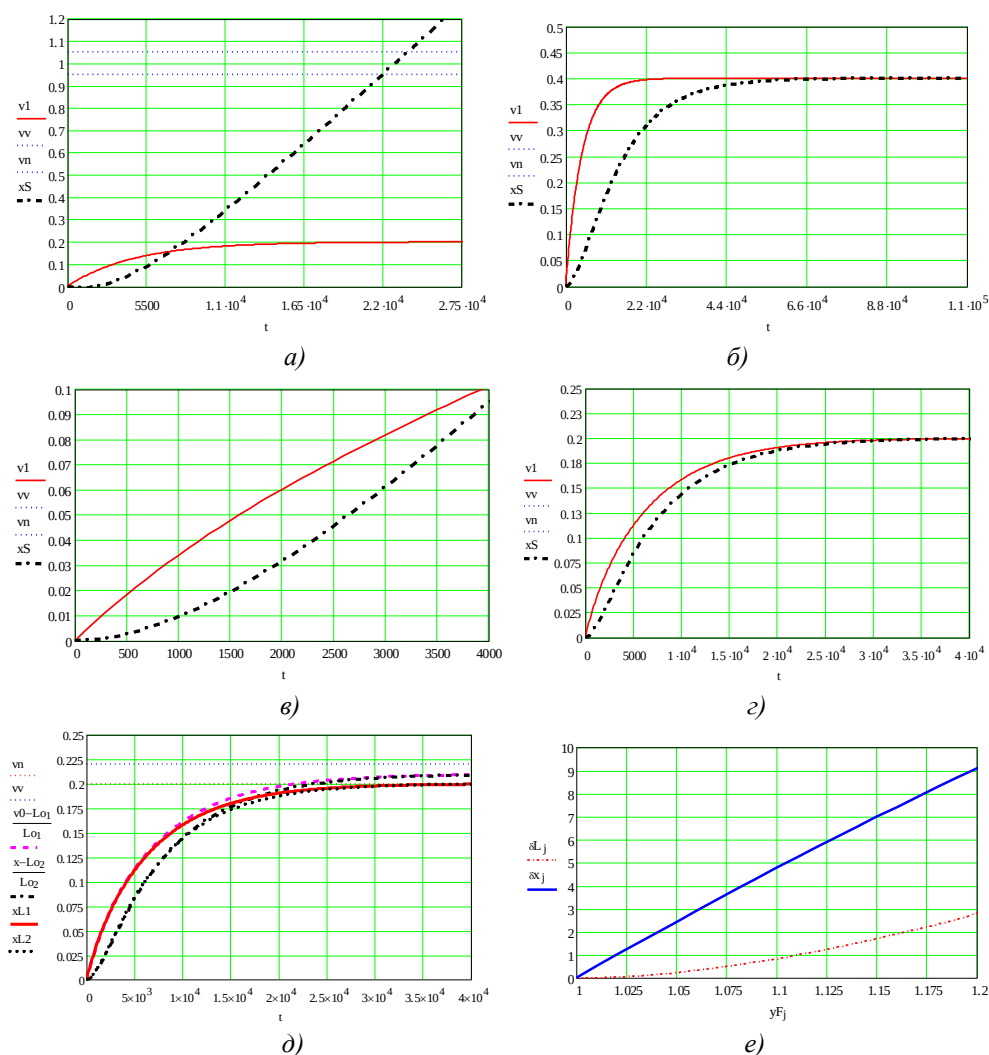


Рисунок 5 – Графики переходных характеристик систем резервуаров

Разработанный комплекс компьютерно-имитационного моделирования технологических процессов, включающий совокупность методов, алгоритмов, методик и комплексов программ, обеспечивающих проведение исследований систем управления в виртуально-физической среде, является одной из основных компонент интегрированного комплекса сетевых автоматизированных лабораторий. Практическое использование полученных результатов при проведении комплексных исследований математических моделей и многофункциональных объектов, технических объектов теплоэнергетики и машиностроения подтверждает адекватность разработанных методов и математических моделей, а также свидетельствует о высокой эффективности разработанной системы компьютерно-имитационного моделирования систем управления в виртуально-физической среде.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прошин И.А., Прошин Д.И., Прошина Р.Д., Сюлин П.В. Управление образовательным процессом подготовки кадров для машиностроения по вектору знаний (статья) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. № 1(2). – С. 705–708.

2. Прошина Р.Д. Концепция построения интегрированных комплексов сетевых автоматизированных лабораторий / И.А. Прошин, Д.И. Прошин, Р.Д. Прошина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. – № 5(2). – С. 527–530.

3. Прошина Р.Д. Математическое моделирование технических систем в нормальной форме пространства состояний // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – № 1(3). – С. 613–616.

УДК 624.071.22:531.011

# **КОМПЛЕКС ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ**

© Д.А. Тарасов, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

## **PROGRAM COMPLEX FOR THE MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF WIRE ROPES**

© D.A. Tarasov, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Предложен численный метод определения напряженно-деформированного состояния стальных канатов. Особенностью метода является возможность учитывать большие стрелы провеса начального очертания стальных канатов. Представлен комплекс программ, реализующий данный метод.

**Ключевые слова:** стрела провеса, канат, нить, усилия, перемещения.

A numerical method for simulating the stress-strain state of wire ropes. Feature of this method is the ability to take into account the large sag initial outlines of steel ropes. The set of programs that implements the method.

**Key words:** sag, rope, thread, effort, movement.

**E-mail:** den517375@ya.ru

В настоящее время расчеты отдельных стальных канатов, несущих поперечную нагрузку, ведутся с использованием известных методик расчета гибких нитей таких ученых, как В.К. Качурин, Н.С. Москалев, Г.С. Ведеников, Р.Н. Мацилинский. Однако применяемые подходы не позволяют с достаточной точностью определять напряженно-деформированное состояние гибких нитей с большими стрелами провеса. Проблема заключается еще и в том, что указать точную границу между нитями с малыми и большими стрелами провеса невозможно, так как эта граница зависит от характера и величины нагрузки, от материала и условий работы нити [4]. В таком случае становится очевидным, что требуется одна методика расчета гибких нитей как с малыми, так и с большими стрелами провеса, обеспечивающая достаточную степень точности.

Для решения поставленной задачи использованы методы математического моделирования и вычислительной математики. Результатом явилась предложенная методика, реализованная в виде программы «Расчет стальных канатов» в среде Microsoft Visual Studio Express 2010. Главное окно программы представлено на рис. 1.

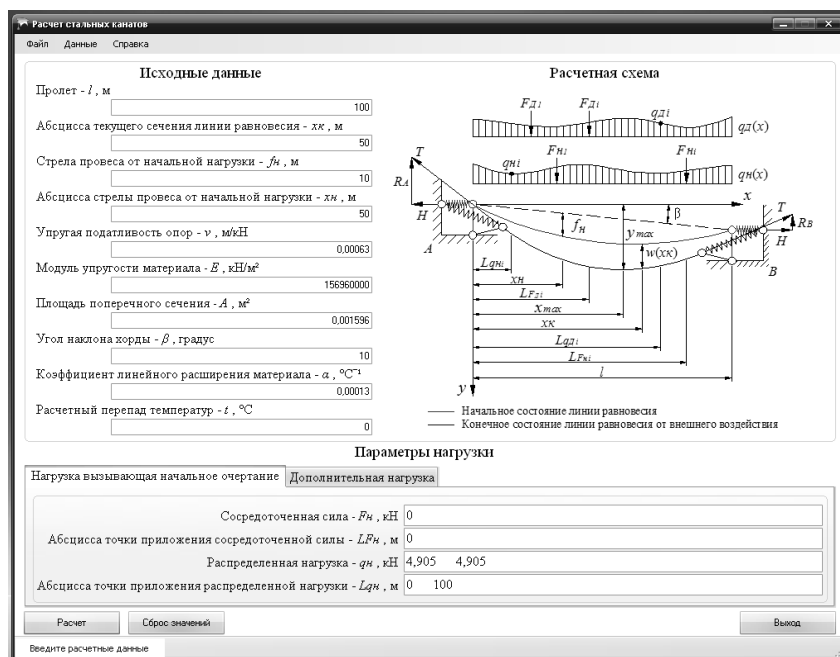


Рисунок 1 – Главное окно программы «Расчет стальных канатов»

При разработке программы предусмотрена возможность создавать XML-документ с числовыми данными и листингом кода для построения в системе MathCAD линии равновесия стального каната от действия нагрузки, вызывающей начальное очертание, и совместного действия начальной и дополнительной нагрузки. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния стального каната при фиксированных значениях геометрических и физических параметров конструкции приведены на рис. 2 и 3.

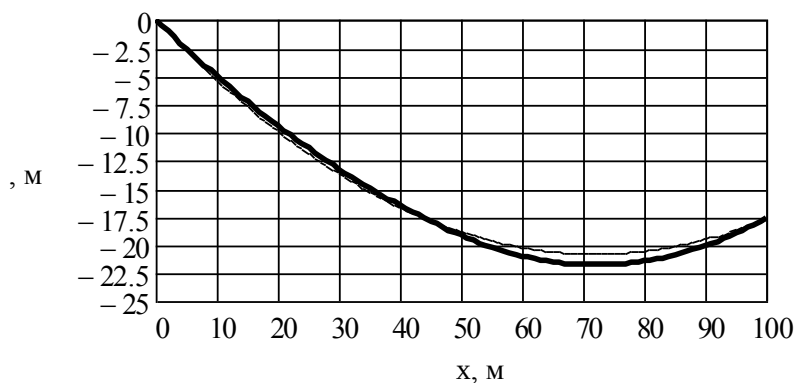


Рисунок 2 – Линия равновесия стального каната:

— — начальное состояние линии равновесия нити,  
 - - - конечное состояние линии равновесия нити от внешнего воздействия

Рисунок 3 – Окно результатов расчета программы «Расчет стальных канатов»



– конечное состояние линии равновесия нити от внешнего воздействия



же нагрузки; при этом ординаты эпюры моментов уменьшены в  $H$  раз и отложены от хорды  $AB$ , соединяющей точки крепления нити. Математически это записывается так [7]:

$$y(x) = \frac{M(x)}{H} + x \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (1)$$

где  $M(x)$  – изгибающий момент в шарнирно опертой балке пролетом  $l$ , от соответствующей нагрузки,  $H \times m$ ,  $H$  – распор, т.е. горизонтальная составляющая опорных реакций в точках крепления нити, равная по величине горизонтальной составляющей продольных усилий  $T$  во всех сечениях нити,  $H$ .

Построение линии равновесия гибкой нити сводится к определению ее распора  $H$  в точках крепления, так как определение изгибающего момента в шарнирно опертой однопролетной балке не вызывает трудностей.

При определении внутренних усилий в однопролетной балке пролетом  $l$  поперечная сила равняется сумме сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения; изгибающий момент равен сумме моментов всех сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения относительно центра тяжести сечения. Математически внутренние усилия при изгибе можно записать следующим образом [6]:

$$Q(x) = \sum F_i + \sum \int q_i(x) \cdot dx; \quad (2)$$

$$M(x) = \sum M_i + \sum F_i \cdot h(x) + \sum \int q_i(x) \cdot h(x) \cdot dx, \quad (3)$$

где  $h(x)$  – плечо силы.

Взяв производные от левой и правой части формулы (1), получим выражение, которое необходимо для определения длины нити [7]:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Q(x)}{H} + \operatorname{tg} \beta, \quad (4)$$

где  $Q(x)$  – поперечная сила в шарнирно опертой балке пролетом  $l$ , от соответствующей нагрузки,  $H$ .

Длина дуги кривой между точками  $A$  и  $B$  равна длине нити и вычисляется по формуле [2]:

$$L = \int_l ds = \int_l \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \int_l \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx, \quad (5)$$

где  $ds$  – длина отрезка нити, имеющая проекции на оси  $dx$  и  $dy$ , м;  $l$  – пролет нити, м.

Обозначим все переменные, относящиеся к начальному очертанию гибкой нити, индексом «н», а к конечной линии равновесия – индексом «к».

Подставив формулу (4) в выражение (5), получим длину нити при действии нагрузки  $q_n(x)$ , вызывающей начальное очертание гибкой нити:

$$L_H = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{Q_H(x)}{H_H} + \operatorname{tg} \beta\right)^2} dx, \quad (6)$$

где  $Q_H(x)$  – поперечная сила в шарнирно опертой балке пролетом  $l$  от начальной нагрузки  $q_n(x)$ ,  $H$ ;  $H_H$  – величина распора нити от начальной нагрузки  $q_n(x)$ ,  $H$ .

Распор гибкой нити от начальной нагрузки равен:

$$H_H = \frac{M_H(x_H)}{f_H}, \quad (7)$$

где  $M_H(x_H)$  – значение изгибающего момента в шарнирно опертой балке пролетом  $l$ , нагруженной начальной нагрузкой  $q_H(x)$ , в сечении со значением абсциссы  $x_H$ , Н×м;  $f_H$  – стрела провеса нити от начальной нагрузки  $q_H(x)$  для координаты  $x_H$ , м.

Рассмотрим случай если нагрузка, вызывающая начальное очертание нити, отсутствует. В формуле (6) при определении длины нити получается неопределенность типа  $\frac{0}{0}$ .

Для раскрытия этой неопределенности предварительно определим уравнение кривой провисания нити от действия равномерно-распределенной нагрузки, равной погонному весу. Кривая может быть аппроксимирована цепной линией. В этом случае нить примет очертание по уравнению

$$y_H(x) = \left( \frac{H_H}{q_H} \cdot \left( \operatorname{ch} \left( \frac{q_H}{H_H} \cdot x \right) - 1 \right) \right) - f_H - x \cdot \operatorname{tg} \beta - \frac{l \cdot \operatorname{tg} \beta}{2}, \quad (8)$$

где  $q_H$  – погонный вес нити, Н/м

При этом распор  $H_H$ , относящийся к первоначальному положению нити, определяется из граничного условия [1]:

$$\frac{H_H}{q_H} + f_H = \frac{H_H}{q_H} \cdot \operatorname{ch} \left( \frac{q_H \cdot l}{H_H \cdot 2} \right), \quad (9)$$

Если первоначальная длина нити равна длине хорды  $AB$ , т.е. стрела провеса нити  $f_H$  от начальной нагрузки  $q_H(x)$  для координаты  $x_H$  равна нулю, то в этом случае уравнение кривой провисания нити будет иметь вид

$$y_H(x) = x \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (10)$$

а распор  $H_H$  будет равен нулю.

Тогда начальная длина нити определяется так:

$$L_H = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \sqrt{1 + \left( \frac{d}{dx} y_H(x) \right)^2} dx. \quad (11)$$

Поскольку распор  $H_K$  не известен до момента его определения, а он входит в уравнение для расчета длины нити при совместном действии начальной  $q_H(x)$  и дополнительной  $q_D(x)$  нагрузки, то уравнение запишем в виде функций от распора  $H_K$ :

$$L_K(H_K) = \int_0^l \sqrt{1 + \left( \frac{Q_K(x)}{H_K} + \operatorname{tg} \beta \right)^2} dx, \quad (12)$$

где  $Q_K(x)$  – поперечная сила в шарнирно опертой балке пролетом  $l$  от совместного действия начальной  $q_H(x)$  и дополнительной  $q_D(x)$  нагрузки, Н.

Гибкая нить работает только на растяжение. Материал нити подчиняется закону Гука. Полное удлинение нити от изменения нагрузки  $q_H(x)$ , вызывающей начальное очертание до совместного действия начальной  $q_H(x)$  и дополнительной  $q_D(x)$  нагрузки на величину  $H_K - H_H$  при постоянном значении распора  $H$  и площади сечения  $A$  можно записать:

$$\Delta L(H_K) = \int_0^l \frac{H_K - H_H}{\cos \varphi \cdot E \cdot A} ds = \frac{H_K - H_H}{E \cdot A} \cdot \int_0^l \frac{dx}{\cos^2 \varphi} = \frac{H_K - H_H}{E \cdot A} \cdot \int_0^l (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) dx, \quad (13)$$

где из тригонометрии известно:

$$\frac{1}{\cos^2 \varphi} = 1 + \operatorname{tg}^2 \varphi. \quad (14)$$

Уравнение (13) является функцией от распора  $H_K$ .

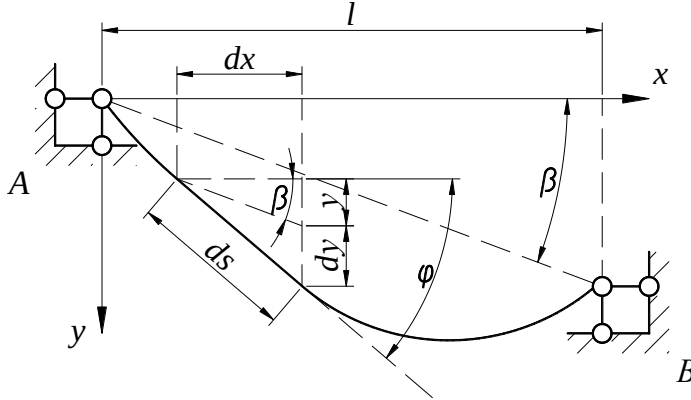


Рисунок 5 – Расчетная схема при определении упругого удлинения гибкой нити

Из рис. 5 видно:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dy + y}{dx}; \quad (15)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{y}{dx} \Rightarrow y = dx \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (16)$$

Подставив выражение (16) в (15), получим

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{dy + dx \cdot \operatorname{tg} \beta}{dx} = \frac{dy}{dx} + \operatorname{tg} \beta = \frac{Q_K(x)}{H_K} + \operatorname{tg} \beta. \quad (17)$$

Полное удлинение гибкой нити от изменения нагрузки после подстановки формулы (17) в (13) примет вид

$$\Delta L(H_K) = \frac{H_K - H_H}{E \cdot A} \cdot \int_0^l \left( 1 + \left( \frac{Q_K(x)}{H_K} + \operatorname{tg} \beta \right)^2 \right) dx, \quad (18)$$

где  $E$  – модуль упругости материала, Па;  $A$  – площадь поперечного сечения нити,  $\text{м}^2$ .

Кроме этого, длина нити изменяется от влияния температуры на величину [3]:

$$\Delta L_t = \frac{l \cdot \alpha \cdot t}{\cos \beta}, \quad (19)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $t$  – расчетный перепад температур,  $^{\circ}\text{C}$ .

Величины  $L_H$ ,  $L_K(H_K)$ ,  $\Delta L(H_K)$  и  $\Delta L_t$  связаны между собой [3]:

$$L_H + \Delta L(H_K) + \Delta L_t = L_K(H_K). \quad (20)$$

Для решения уравнения (20) и нахождения распора гибкой нити  $H_K$  используется вычислительный блок *given-find*.

Величина продольного усилия в гибкой нити равна [1]

$$T_K = \sqrt{H_K^2 + R^2}, \quad (21)$$

где

$$R_A = Q_K(0) + H_K \cdot \operatorname{tg} \beta; \quad (22)$$

$$R_B = Q_K(l) - H_K \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (23)$$

Прогиб нити, включающий ее упругую деформацию и кинематическое перемещение, можно представить в виде функции от абсциссы  $x$ :

$$w(x) = y_K(x) - y_H(x), \quad (24)$$

где  $y_K(x)$  – значение ординаты сечения линии равновесия нити от совместного действия начальной  $q_H(x)$  и дополнительной  $q_D(x)$  нагрузки,  $y_H(x)$  – значение ординаты сечения линии равновесия нити от действия начальной  $q_H(x)$  нагрузки или собственного веса в случае ее отсутствия.

Таким образом, предложенная математическая модель (включая отдельные ее фрагменты [5, 8]) по определению напряженно-деформированного состояния стальных канатов дает возможность вести расчет как с малыми, так и с большими первоначальными стрелами провеса в отличие от известных методик по расчету пологих гибких нитей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленя Е.И. *Металлические конструкции: спец. курс : учеб. пособие для вузов* / Е.И. Беленя, Н.Н. Стрелецкий, Г.С. Ведеников [и др.]; под общ. ред. Е.И. Беленя. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1991. – 687 с.
2. Бронштейн И.Н. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов* / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев; под ред. Г. Гроше, В. Циглера. – М. : Наука, 1980. – 976 с.
3. Качурин В.К. *Проектирование висячих и вантовых мостов* / В.К. Качурин, А.В. Брагин, Б.Г. Ерунов; под общ. ред. В.К. Качурина. – М. : Транспорт, 1971. – 280 с.
4. Качурин В.К. *Теория висячих систем*. – Л. : Госстройиздат, 1962. – 223 с.
5. Коновалов В.В. *Компьютерное моделирование определения реакций опор гибких барьеров* / В.В. Коновалов, Д.А. Тарасов, В.Ю. Зайцев, Н.В. Байкин // *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2012. – № 3. – С. 72–79.
6. Макаров Е.Г. *Сопротивление материалов на базе Mathcad*. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 512 с.
7. *Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический* : В 2-х кн. – Кн. 1 / под ред. А.А. Уманского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1972. – 600 с.
8. Тарасов Д.А. *Математическое моделирование оптимизации параметров несущих элементов, выполненных из стальных канатов* / Д.А. Тарасов, В.В. Коновалов, В.Ю. Зайцев // *Интеграл*. – 2012. – № 6. – С. 118–120.

УДК 514.18: 004.92

### КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

© И.И. Привалов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

### COMPUTER TECHNOLOGY OF SOLVING TASKS OF DESCRIPTIVE GEOMETRY

© I.I. Privalov, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Сегодня передовые вузы практически полностью отказались от «ручной, карандашной» технологии обучения инженерной графике и используют IP-технологии и предпринимают успеш-

ные шаги применения компьютера и для решения задач начертательной геометрии. Статья посвящена преодолению объективных трудностей при решении задач начертательной геометрии с использованием компьютерной технологии.

**Ключевые слова:** начертательная геометрия, 3D-модель, чертеж, система координат, графический редактор КОМПАС-3D.

Today the leading universities almost completely abandoned the «manual, pencil» technologies of teaching engineering graphics and use IP technology and take successful steps application of computer and for the decision of tasks of descriptive geometry. The article is devoted to overcome the objective difficulties in solving the tasks of descriptive geometry with use of computer technology.

**Key words:** descriptive geometry, 3D-model, drawing, coordinate system, graphic editor КОМПАС-3D.

Компьютерная технология предполагает использование графической системы проектирования на примере КОМПАС-3D [1]. Степень использования САД-технологий при решении задач начертательной геометрии может варьироваться [2]. Например, решение задачи может быть осуществлено без карандаша и бумаги, а лишь используя графический редактор КОМПАС-3D и КОМПАС-График.

Для этого осуществим следующие шаги:

- построим 3D-модель пирамиды,
- создадим ассоциативный чертеж по этой модели,
- решим конкретную метрическую задачу средствами графического редактора.

Построение 3D-модели пирамиды будем осуществлять при помощи операции «По сечениям», в которой формирование объемного элемента производится по плоскостям, в каждой из которых расположен эскиз. При этом эскизы могут быть расположены в произвольно ориентированных плоскостях, в каждом эскизе может быть только один контур, в крайних эскизах (первом и последнем) может быть по одной точке (вместо контура).

После открытия нового документа «Деталь» сохраняем файл, предварительно внося обозначение и наименование в «Свойства модели».

Принимаем ориентацию «Изометрия XYZ». При этом, сравнивая принятые системы координат (в начертательной геометрии положительное значение  $x$  направлено влево, положительное значение  $y$  направлено на наблюдателя, а  $z$  – вверх; в КОМПАС-3D при «Изометрии XYZ» ось  $x$  направлена вправо,  $y$  – вверх,  $z$  – влево), вводим в КОМПАС-3D координату  $x$  со знаком «минус», а координаты  $z$  и  $y$  меняем местами.

Таким образом, для правильного отображения точек пирамиды, заданных для системы координат начертательной геометрии, надо сначала изменить данные:

- для точки  $A$  (10, 5, 15) на компьютере ввести  $A$  (-10, 15, 5),
- для точки  $B$  (75, 20, 45) на компьютере ввести  $B$  (-75, 45, 20),
- для точки  $C$  (35, 45, 60) на компьютере ввести  $C$  (-35, 60, 45),
- для точки  $S$  (50, 25, 55) на компьютере ввести  $S$  (-50, 25, 55).

Активизируем панель «Пространственные кривые» и последовательно с помощью команды «Точка» вводим координаты точек  $A$ ,  $B$  и  $C$ . В дереве модели вместо имен точек 1, 2, 3, указанных системой по умолчанию, присваиваем имена  $A$ ,  $B$  и  $C$ , соответственно.

После этого создаем вспомогательную плоскость «Плоскость через три вершины» на инструментальной панели «Вспомогательная геометрия». Для этого последовательно указываем левой клавишей мыши на точки  $A$ ,  $B$  и  $C$  в «дереве модели». Там же в дереве модели выбираем созданную «плоскость через три вершины», переходим на эту плоскость при помощи команды «Эскиз» и при помощи команды «Отрезок» или «Непрерывный ввод объектов» соединяем точки, получая эскиз треугольника  $ABC$  (рис. 1).

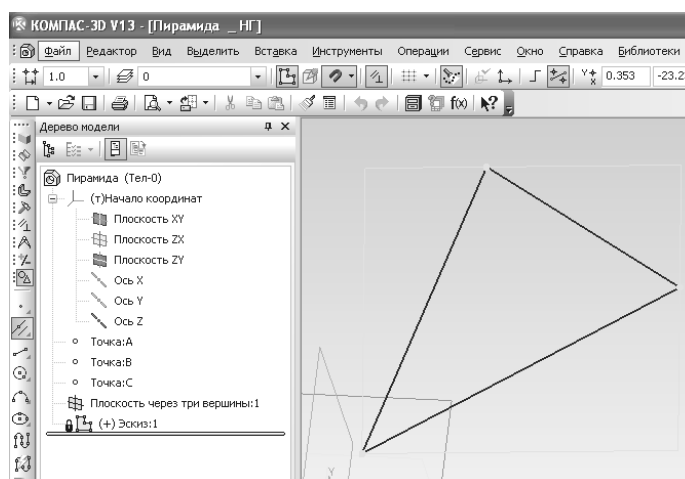


Рисунок 1

Активируем панель «Пространственные кривые» и аналогично трем точкам основания A, B и C вводим координаты точки S. Затем на инструментальной панели «Вспомогательная геометрия» командой «Плоскость через вершину параллельно другой плоскости» строим вспомогательную плоскость параллельно плоскости ABC основания пирамиды. Выделяем созданную плоскость и в ней задаем эскиз точки S (инструментальная панель «Геометрия», команда «Точка»).

Операцией «По сечениям» создаем 3D модели пирамиды ABCS (рис. 2,а). Еще раз, окончательно, сохраняем файл с моделью, после чего выполняем ассоциативный чертеж.

Оставляем два вида: «спереди» (фронтальная проекция), «сверху» (горизонтальная проекция). Зазор между видами устанавливается по умолчанию 15 мм. Его можно изменить, предварительно рассчитав. Или изменить позднее, в процессе нанесения буквенных обозначений (рис. 2,б). Виды необходимо «разрушить», тем самым подготовив их к дальнейшим преобразованиям в процессе решения метрических задач.

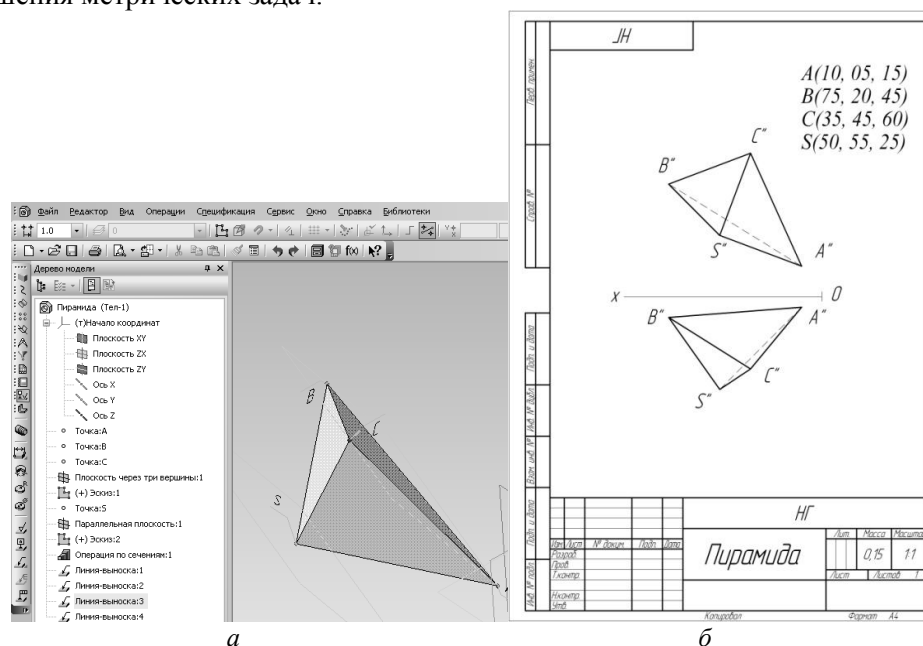


Рисунок 2

Теперь можно скопировать изображение пирамиды с чертежа и вставить в новый чертеж для решения той или иной метрической задачи.

Сформулируем конкретную задачу: вращением вокруг оси  $j \perp H$  определить расстояние  $SK$  от вершины  $S$  до основания  $ABC$ .

Для решения требуется основание  $\triangle ABC$  и точка  $S$ , при этом ребра пирамиды  $AS$ ,  $BS$  и  $AC$  удаляем, чтобы не загромождать чертеж.

Далее решение иллюстрируется (рис. 3–5) с пояснением по каждому рисунку.

Рис. 3: Цель вращения: перевести основание  $ABC$  из общего положения в проецирующее. Тогда расстояние от точки  $S$  до плоскости  $ABC$  будет находится просто [1]. Так как  $j \perp H$ , то в  $\triangle ABC$  надо провести горизонталь  $h$  и её вместе с  $\triangle ABC$  и точкой  $S$  повернуть до положения  $h \perp V$ . Проводим проекции горизонтали  $h$ :  $B''D'' \parallel x$ ,  $D'' \in A''C''$ , тогда  $D' \in A'C'$  и  $B'D' \equiv h'$ . Ось вращения  $j \perp H$  проводим через точку  $B$  горизонтали.

Рис. 4: Поворачиваем проекцию  $D'$  до положения  $B'D_1' \perp x$ . Так как при вращении геометрических образов их проекции на плоскости  $H$ , перпендикулярной оси вращения  $j$ , не изменяются, а лишь перемещаются, строим новую проекцию  $A_1'B'C_1'$  треугольника  $ABC$ , равную заданной  $A'B'C'$ . Чтобы не нарушить размеры пирамиды,  $S'$  поворачиваем в ту же сторону и на тот же угол, что и  $A_1'$  и  $C_1'$ . В компьютерном редакторе данное действие достигается выделением горизонтальной проекции  $A'B'C'$  вместе с точкой  $S'$  и поворотом (на панели «Редактирование» или командой «Поворот» из контекстного меню). При повороте левой кнопкой мыши указываем на  $B'$  (центр вращения), а затем на  $D'$  и перемещаем фантом до вертикального расположения  $B'D'$ . После поворота точки  $D'$  её новое положение носит название  $D_1'$  (аналогично для других поворачиваемых точек).

Рис. 5: На плоскости  $V$  проекция  $B''$  неподвижна, а проекции  $A_1''$  и  $C_1''$  перемещаются по своим следам-носителям  $\pi_{VA}$  и  $\pi_{VC}$ . В результате  $A_1''$ ,  $B''$  и  $C_1''$  расположатся на одной прямой, т.е. плоскость  $ABC$  стала после поворота фронтально-проецирующей,  $A_1''B''C_1''$  – след-носитель.

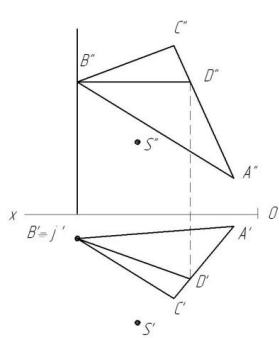


Рисунок 3

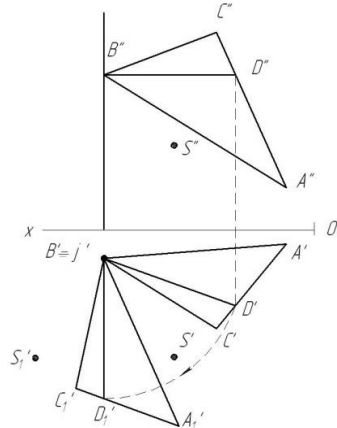


Рисунок 4

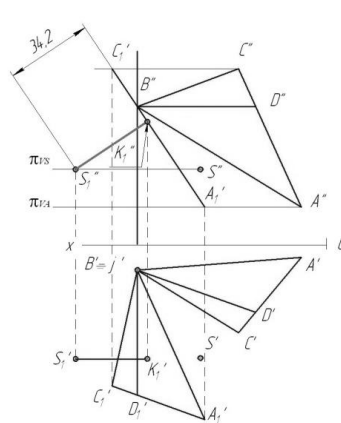


Рисунок 5

Фронтальная проекция  $S_1''$  точки  $S$  лежит на пересечении вертикальной линии связи со следом-носителем  $\pi_{VS}$ . Опускаем из  $S_1''$  перпендикуляр на  $A_1''C_1''$ . Длина отрезка  $S_1''K_1''$  равна искомой высоте пирамиды. Горизонтальная проекция  $S_1''K_1''$  должна быть  $\parallel x$  или  $\perp B'D_1'$ .

В редакторе КОМПАС данные построения достигаются простыми командами «параллельный отрезок», «перпендикулярный отрезок» или вариациями команды «вспомогательная прямая» с последующей обводкой отрезками, что не представляет особой трудности.

После завершения построений вспомогательные построения можно удалить, основную надпись заполнить, как показано на рисунке 6.

АксонOMETрические изображения и, тем более, 3D компьютерные модели обладают значительно большей наглядностью, чем проекционные чертежи. Переход к чертежу от 3D компьютерной модели более понятен студенту, чем простое построение изображений чертежа по координатам.

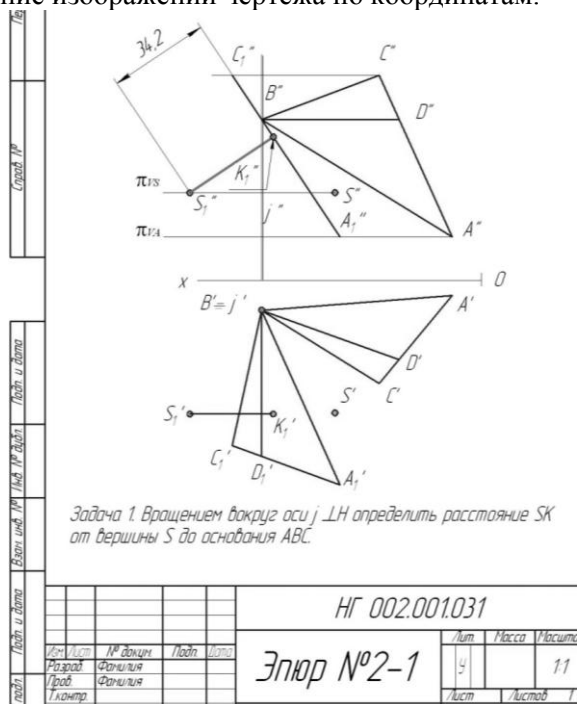


Рисунок 6

В результате выполнения приведенной работы студенты осваивают решение конкретной метрической задачи компьютерным способом, кроме того, получают необходимые навыки работы в КОМПАС-3D и КОМПАС-График, что позволяет в дальнейшем более эффективно осваивать последующие разделы инженерной графики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлов В.В., Привалов И.И., Нестеренко Л.А., Растегаев А.И. Решение метрических задач начертательной геометрии с использованием программы КОМПАС-3D // Современные информационные технологии : Труды международной научно-технической конференции. Вып. 17. – Пенза : ПГТА, 2013. – С. 245–249.
2. Нестеренко Л.А., Привалов И.И., Юдина Е.Ю. Создание модели пирамиды в Компас-3D для решения метрических задач // Геометрия и графика: Научный журнал. – 2013. – Т. 1. № 2 (2). – С. 62–65.



---

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

---

УДК 681.3.067

### ИЗМЕРИТЕЛЬ ОБЪЕМНОГО РАСХОДА ЖИДКОСТИ

© *П.И. Артамонов, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *Б.Л. Свистунов, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *Б.А. Ахметов, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева (г. Алматы, Республика Казахстан)*

### MEASURING INSTRUMENTS OF A VOLUME CONSUMPTION OF LIQUIDS

© *P.I. Artamonov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *B.L. Svistunov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *B.A. Akhmetov, Kazakstan State Technological University (Kazakstan)*

Статья посвящена технической реализации высокоточного измерительного устройства объемного расхода жидкости, преимущественно нефтяных продуктов с использованием мерного гидравлического цилиндра. Точность обеспечивается за счет размещения емкостного датчика на подвижном поршне. Определение диэлектрической проницаемости жидкости осуществляется за счет алгоритмической избыточности.

**Ключевые слова:** объемный расход, мерный цилиндр, емкостный датчик, диэлектрическая проницаемость жидкости.

The option of technical realization of high-precision measuring instruments of a volume consumption of liquids, including oil products with use of a method of a measured hydraulic cylinder is considered. Realization of capacitor sensors of position of the free dividing piston is offered and in details considered. The algorithm of determination of dielectric permeability of spent liquid with use of a method of algorithmic redundancy is offered.

**Key words:** volume consumption, measured hydraulic cylinder, capacitor sensors, determination of dielectric permeability of spent liquid

**E-mail:** sbl@penzgtu.ru

Задача повышения точности, надежности и технологичности средств измерения расхода жидкостей, в частности нефтепродуктов, остается актуальной, несмотря на значительные усилия разработчиков соответствующей аппаратуры [1]. В ряде систем измерения и контроля расхода жидкости используются методы косвенного определения объемного или массового расхода – через измерение уровня, плотности, температуры, скорости потока с последующим расчетом искомого результата, как правило, по эмпирическим соотношениям. Как следствие, в процессе определения расхода возникают методические погрешности, для уменьшения которых используются различные конструктивные и технологические усовершенствования. Это приводит в конечном итоге к достаточно высокой стоимости расходомеров, их недостаточной эксплуатационной и метрологической надежности.

Наиболее серьезные трудности при использовании косвенных методов возникают при измерениях расхода нефтепродуктов, т.к. в производственных

условиях существует значительный разброс таких параметров нефтепродуктов, как плотность, вязкость, загазованность, доля воды. Усложняет проблему то обстоятельство, что все эти параметры различным образом изменяются в зависимости от температуры.

В значительной степени от перечисленных недостатков свободны способы прямого измерения объемного расхода. Они подразумевают подачу жидкости к потребителю через мерную емкость и измерение количества опорожнения (или измерение времени опорожнения) этой емкости. В то же время в известных расходомерах с мерным цилиндром (см., например, [2], использующихся на морских нефтяных платформах) существует серьезная проблема, заключающаяся в относительно малой длительности единичного хода поршня, что затрудняет точность измерения соответствующего интервала времени простыми средствами. Также возникает необходимость использовать достаточно сложные системы интерполяции для измерения длительности неполных («дробных») ходов поршня. Эти проблемы частично решаются увеличением числа поршней и усложнением порядка их подключения.

Так, например, в четырехпоршневых расходомерах топлива фирмы «Ono Sokki Co. Ltd» (Япония) происходит поочередное заполнение топливом из бака и опорожнение во впускной коллектор двигателя внутреннего сгорания четырех мерных цилиндров малого объема. Точность контроля расхода обеспечивается здесь путем подсчета числа тактов работы расходомера. Существенным недостатком этого расходомера является сложная система распределения потоков топлива. В способе прямого измерения объемного расхода топлива [3] указанные недостатки поршневых расходомеров устраняются за счет использования оригинального мерного гидроцилиндра со свободным разделительным поршнем. Расходуемая жидкость протекает через реверсивно заполняемый мерный гидроцилиндр, а величина объемного расхода определяется по числу циклов заполнения – опорожнения цилиндра. Объем, соответствующий неполному ходу, определяется по положению поршня в цилиндре. Схема мерного гидроцилиндра со свободным разделительным поршнем приведена на рис. 1. Цилиндрический корпус 1, имеющий калиброванные внутренний диаметр  $D$  и длину  $L$  внутренней полости, ограничен торцевыми стенками 2 и 3, на которых размещены (или нанесены) электроды 4 и 5, соответственно. Электроды являются обкладками емкостного датчика. Торцевые стенки 2 и 3 имеют патрубки 6 и 7 с каналами 8 и 9 для втекания и вытекания жидкости в полость гидроцилиндра и обратно.

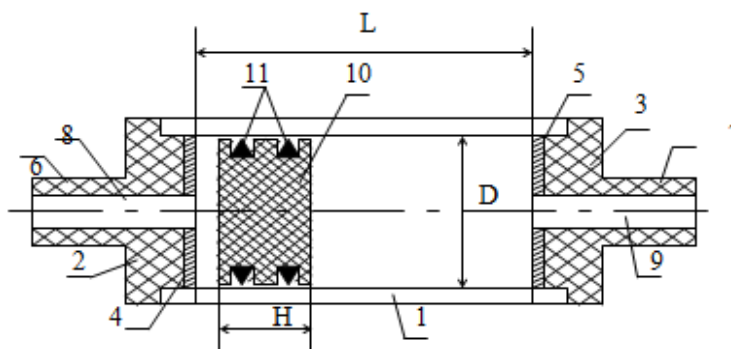


Рисунок 1 – Схема мерного гидроцилиндра со свободным разделительным поршнем

Внутри гидроцилиндра размещен свободный поршень 10 с уплотнительными кольцами 11, имеющий толщину  $H$ . Электроды 4...5 являются чувстви-

тельными элементами емкостного датчика, служащими для определения положения поршня 10.

Значения  $D$ ,  $L$  и  $H$  определяют калиброванный полезный объем внутренней полости гидроцилиндра:  $V = \pi D^2 H / 4$ .

В принципе, для упрощения реализации способа моменты завершения хода поршня можно фиксировать с помощью концевых выключателей, например герконов. Однако использование емкостных датчиков, кроме фиксации промежуточного положения поршня, дает дополнительные возможности, а именно обеспечивает определение диэлектрической проницаемости жидкости.

Рассмотрим подробнее алгоритм определения диэлектрической проницаемости расходуемой жидкости. Для упрощения выкладок пренебрежем толщиной поршня. С учетом того, что электроды 4 и 5 (рис. 1) образуют конденсатор, электрическая эквивалентная схема датчика может быть представлена следующим образом (рис. 2).

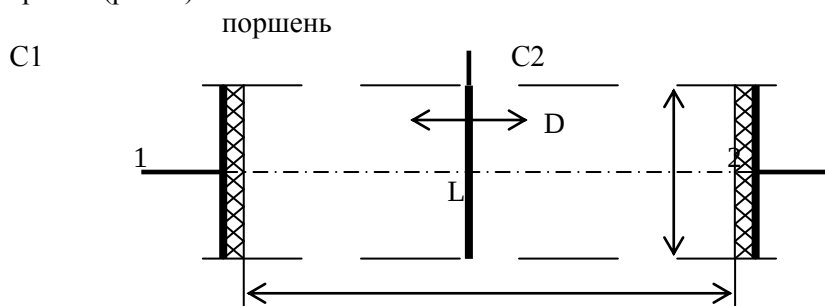


Рисунок 2 – Электрическая эквивалентная схема датчика

Для определения диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ж}$  перекачиваемой жидкости определяется емкость  $C_{12}$  конденсатора с обкладками 1 и 2 в двух крайних положениях поршня. Пусть первое положение соответствует полностью заполненному жидкостью цилиндру.

Тогда  $C'_{12} = \epsilon_0 \epsilon_{ж} \frac{S}{L}$ , где  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ . При нахождении поршня в противоположном крайнем положении цилиндр пуст. Примем, что он заполнен воздухом, для которого  $\epsilon_{в} \approx 1$ . Тогда емкость  $C''_{12} = \epsilon_0 \epsilon_{в} \frac{S}{L}$ . Определив отношение

$\frac{C'_{12}}{C''_{12}} = \frac{\epsilon_{ж}}{\epsilon_{в}} \cong \epsilon_{ж}$ , получим информацию о диэлектрической проницаемости расходуемой жидкости. Измерение отношения емкостей датчика не является технически сложной задачей, см., например, [4]. Результат может быть уточнен усреднением по определенному числу циклов. При измерении расхода неполярных жидкостей, для которых справедливо соотношение Клаузиуса – Мосотти, характеризующее функциональную связь плотности жидкости и ее диэлектрической проницаемости [5], возможно определение также плотности расходуемой жидкости.

Расчеты и экспериментальные исследования показали, что, например, при полезном объеме мерного гидроцилиндра  $V \geq 1000 \text{ см}^3$  и задании соотношения  $V \geq 20 v_{\max}$ , где  $v_{\max}$  – максимальная скорость расхода контролируемой жидкости, суммарная относительная погрешность измерения может быть обеспечена на уровне 0,2 %, а минимальное время хода поршня из одного крайнего положения в другое составляет десятки секунд.

Повысить точность определения расхода при неполном ходе поршня можно, введя дополнительную структурную избыточность, реализуемую размещением дополнительной обкладки на подвижном поршне измерителя. Подвижные и неподвижные электроды подключены к схеме преобразователя емкости в унифицированный сигнал. При нахождении поршня в середине цилиндра емкости секции датчика  $C'_1$  и  $C'_2$  равны. При некотором промежуточном положении поршня емкость одной из секций (например,  $C'_1$ ) увеличивается, а другой –  $C'_2$  – уменьшается на одну и ту же величину  $\Delta C$ . Разность  $C'_1 - C'_2 = 2\Delta C$  пропорциональна объему цилиндра (т.е. объему перекачиваемой жидкости), меньшему, чем полный объем цилиндра. Для создания емкостных датчиков перспективна микроэлектронная технология, описанная, например, в [6].

Другой вариант построения измерителя расхода жидкости реализуется путем определения разности  $\Delta p$  в левой и правой полостях мерного цилиндра. При этом используется один дифференциальный емкостный датчик. Одна из возможных реализаций датчика [7] приведена на рис. 3.

На противоположных поверхностях неподвижной пластины 1 из электроизоляционного материала располагаются центральные неподвижные кольцевые электроды 2; внешние подвижные круглые электроды, (изготавливаемые обычно как одно целое с приемными мембранами) 3; механический элемент 4 жесткой связи приемных мембран, проходящий через сквозное отверстие в пластине 1; 5 – внешний корпус;  $p_1$  и  $p_2$  – давления, создаваемые во внутренних полостях датчика; их разность  $\Delta p$  является информативным параметром.

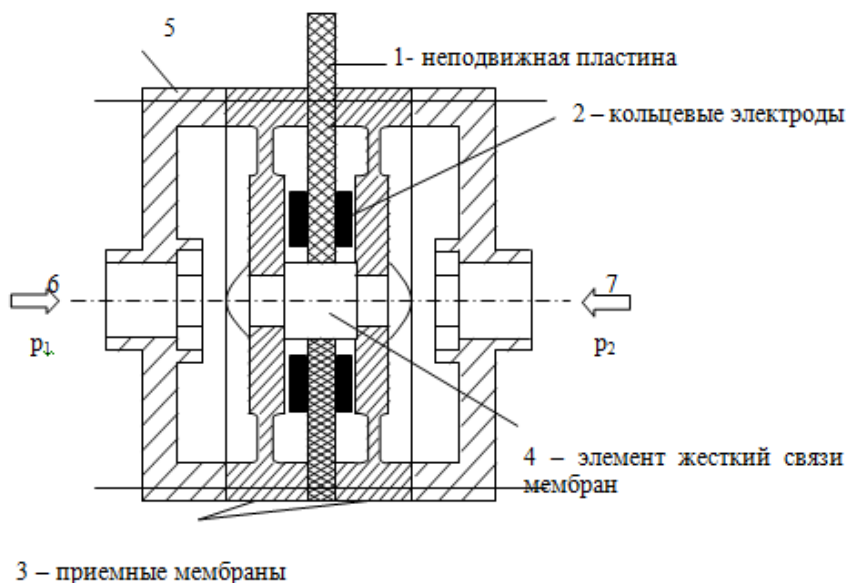


Рисунок 3 – Реализация дифференциального емкостного датчика

Центры приемных мембран, деформируемых под воздействием давлений, жестко связаны элементом 4, что обеспечивает параллельное перемещение жестких центров мембран. Это позволяет получать линейную характеристику преобразования. Основной характеристикой датчика является зависимость емкости датчика СД от измеряемой разности давлений  $\Delta p$ . Значение емкости СД зависит от расстояния между электродами, которое определяется перемещениями  $\Delta d$  жестких центров приемных мембран (см. рис. 2). Теоретически для круглых металлических мембран с жестким центром при выполнении условия  $\Delta d/h < 1$  и с учетом того, что для значения материала мембран коэффициента Пуассона  $\nu \approx 0,3$  можно использовать следующее выражение [8]:

$$p = \frac{Eh^4}{R^4} \left[ k_1 \left( \frac{\Delta d}{h} \right) + k_2 \left( \frac{\Delta d}{h} \right)^3 \right], \quad (1)$$

где  $R$  – внешний радиус мембраны;  $r$  – радиус элемента жесткой связи (см. рис. 4);  $k_{1,2}$  – постоянные коэффициенты,  $E$  – модуль упругости материала мембран.

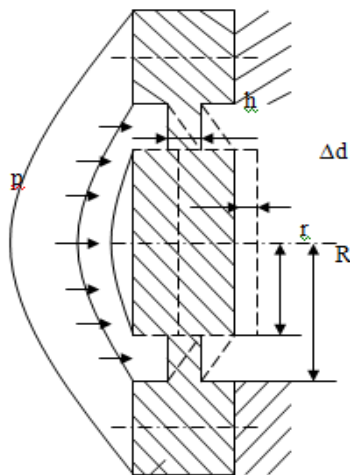


Рисунок 4 – Схема деформации мембраны от измеряемого давления  $p$

Первый член в квадратных скобках в правой части выражения (1) определяет изгибную деформацию мембраны под воздействием давления  $p$ , а второй – ее деформацию растяжения.

При малых перемещениях  $\Delta d$  элемента жесткой связи превалирует изгибная деформация, и зависимость между  $\Delta d$  и давлением  $p$  является практически линейной. При значениях  $\Delta d$ , соизмеримых с  $h$ , увеличивается влияние деформации растяжения и зависимость между значениями  $\Delta d$  и  $p$  становится нелинейной. В пределах задававшихся давлений от 0 до 150 кПа нелинейность зависимости (1) не превышает 0,02 %.

Таким образом, механическая конструкция датчика потенциально обеспечивает достижение его достаточно высоких метрологических характеристик. Следующим шагом получения информации об искомом давлении является преобразование перемещения  $\Delta d$  в разность емкостей плеч датчика  $\Delta C$ .

На рис. 5 показано подключение емкостного дифференциального датчика.

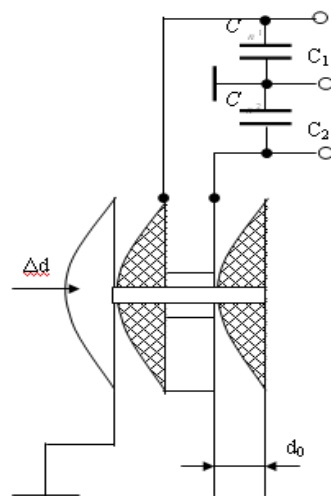


Рисунок 5 – Подключение емкостного дифференциального датчика

При начальном междуэлектродном расстоянии  $d_0$  и начальных значениях емкостей  $C_1 = C_2 = C_0$  (см. рис. 3) зависимость изменений каждой из емкостей  $C_1$ ,  $C_2$  датчика от перемещения  $\Delta d$  элемента жесткой связи выражается следующей формулой:

$$\left| \frac{\Delta C_{1(2)}}{C_0} \right| = \left| \frac{C_0 - C_{1(2)}}{C_0} \right| = \frac{\frac{\Delta d}{d_0}}{1 \pm \frac{\Delta d}{d_0}}. \quad (2)$$

При малых деформациях мембран ( $\Delta d/d_0 < 5\%$ ) зависимости (2) как для  $C_1$ , так и для  $C_2$  являются с высокой точностью линейными. На рис. 6 приведены зависимости относительных изменений емкостей  $\Delta C/C_0$  от нормированных перемещений  $\Delta d/d_0$  для уменьшающегося и увеличивающегося междуэлектродных зазоров.

Штриховой линией обозначена линейная зависимость, приведенная для сравнения.

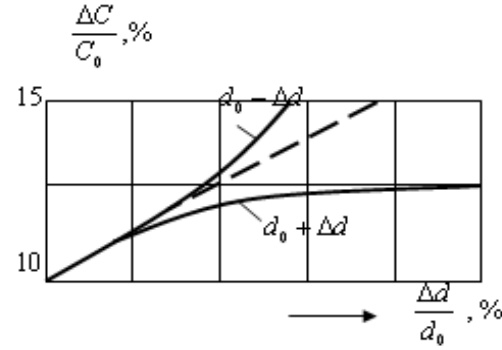


Рисунок 6 – Графики изменения емкостей дифференциального датчика

При определении реальных характеристик преобразования необходимо учитывать также влияние паразитных емкостей  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ , включенных параллельно выходам датчика (рис. 5). Положив, что  $C_{n1} = C_{n2} = C_n$  и обозначив  $C_n/C_0 = \alpha$ , удобно записать:

$$C_{1(2)} = C_0 \left( \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta d}{d_0}} + \alpha \right). \quad (3)$$

Получим зависимость  $C_{1(2)}$  от искомого давления  $p$ . Линейную часть выражения (1), соответствующую малым значениям  $\Delta d$ , можно представить следующим образом:

$$\Delta d = \frac{1}{2c} p_M, \quad (4)$$

где  $c = \frac{k_1 E h^3}{R^4}$  – изгибная жесткость мембраны. С учетом (4) выражение (3) принимает вид:

$$C_{1(2)} = C_0 \left( \frac{1}{1 \pm p/2cd_0} + \alpha \right). \quad (5)$$

Чувствительность каждого из плеч датчика определяется производной от выходной емкости  $C_{1(2)}$  по измеряемому давлению. Например, для второго плеча она равна

$$S = \frac{dC_2}{dp_M} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_0^2} \frac{1}{2c} \frac{1}{(1 - p/2cd_0)^2}, \quad (6)$$

где  $A$  – площадь электродов.

С учетом того, что абсолютные значения изменений междуэлектродных расстояний для плеч датчика одинаковы, можно записать следующее выражение для их чувствительностей:

$$S = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d_0^2} \frac{1}{2c} \pm 2 \frac{p}{2cd_0}. \quad (7)$$

При этом нелинейность функции преобразования при практически всегда выполняемом условии  $\left| \frac{p}{2cd_0} \right| < 0,05$  составляет менее 0,012 %.

Из выражения (7) следует, что чувствительность датчика может быть увеличена при снижении начального значения междуэлектронного зазора  $d_0$  и уменьшения изгибных жесткостей с мембран. Однако при малых значениях  $d_0$  перемещения жестких центров  $\Delta d$  становятся соизмеримыми с этими значениями, и, в соответствии с выражением (2), возрастает нелинейность функции преобразования.

Дополнительное введение избыточности [4] путем увеличения числа обкладок и использования специального алгоритма их опроса позволяет также осуществлять фиксацию наличия и определение концентраций фаз жидкости, а также корректировку влияния на результат измерения температурных изменений геометрических размеров цилиндра.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов П.И. Способ прямого измерения объемного расхода жидкости / П.И. Артамонов, Б.Л. Свистунов, П.Т. Харитонов // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : Сб. тр. Международной НТК. – Пенза, 2011.
2. Kinghorn F.C. Challenging areas in flow measurement // Measurement and Control. – 2008. – 21, № 8 (англ.).
3. Свистунов Б.Л. Способ, система и устройство для измерения объемного расхода топлива двигателем внутреннего сгорания / Б.Л. Свистунов, П.Т. Харитонов. – Патент РФ №2323365 от 27.04.2008.
4. Артамонов П.И. Устройство измерения емкости датчика для информационно-управляющих систем // Проблемы управления, обработки и передачи информации : Сб. научн. тр. – Саратов, 2011.
5. Скворцов Б.В. Приборы и системы контроля качества углеводородных топлив / Б.В. Скворцов, Н.Е. Конюхов, В.Н. Астапов. – М. : Энергоатомиздат, 2000.
6. Коломицев Д.В. Микроэлектронные датчики давления на емкостном принципе действия // Надежность и качество : Сб. тр. Международного симпозиума. – Пенза, 2011.

7. Ахметов Б.А. Задачи совершенствования насосно-циркуляционного комплекса и эксплуатационных свойств буровых растворов / Б.А. Ахметов, К.К. Нугуманов, А.М. Ткенов // *Машины и оборудование для нефти и газа : Сб. тр., Алматы : КазНТУ, 2010.*

8. Бурцев С.А. Расчет упругих характеристик измерительных диафрагм датчиков давления / С.А. Бурцев, И.А. Волошина, И.А. Ильина // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2005. – Т. 54, № 14. – (Машиностроение).*

9. Свистунов Б.Л. Классификация способов построения инвариантных средств измерения параметров электрических цепей // *Датчики и системы. – 2003. – № 2.*

**УДК 681.51**

**МНОГОКОНТУРНАЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНОЙ  
МЕЖЭЛЕКТРОДНОГО ЗАЗОРА ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ  
ОБРАБОТКЕ**

© *П.Ю. Волков, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

**MULTILOOP ELECTROHYDRAULIC CONTROL SYSTEM  
OF INTER-ELECTRODE DISTANCE FOR ELECTRIC  
DISCHARGE MACHINING**

© *P.Yu. Volkov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассмотрена многоконтурная электрогидравлическая система автоматического управления с корректирующим контуром. Корректирующий контур выполнен на базе магнитострикционного преобразователя. Предлагаемая система управления обладает высокими показателями качества и может использоваться в копировально-прошивочных электроэрозионных станках для регулирования межэлектродного зазора.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, межэлектродный зазор, многоконтурная система автоматического управления.

In article the multiloop electrohydraulic control system of system with a correcting contour is considered. The correcting contour is made on base magnetostrictive actuator. The offered control system possesses high indicators of quality and can be used in the copying-broaching electric discharge machines for regulatory inter-electrode distance.

**Key words:** electric discharge machining, inter-electrode distance, multiloop electrohydraulic control system.

**E-mail:** volkovpav@yandex.ru.

Копировально-прошивочная электроэрозионная обработка представляет собой способ формообразования поверхностей деталей, при котором профиль электрода-инструмента с помощью электрической эрозии воспроизводится на электроде-заготовке. Важным преимуществом данного технологического процесса является возможность обработки заготовок из материалов, твердость которых значительно превосходит твердость инструмента.

Характерной особенностью электроэрозионной обработки (ЭЭО) является обязательное наличие зазора между электродами, которые погружены в диэлектрическую среду и подключены к генератору импульсов напряжения. Вели-



чина межэлектродного зазора прямо пропорциональна фактическому напряжению, при котором происходит пробой диэлектрика, а следовательно, определяет энергетические показатели процесса. В свою очередь, энергия, которая выделяется в межэлектродном зазоре, определяет качество поверхности копируемой детали. Известна формула (1), которая увязывает значение шероховатости обрабатываемой поверхности  $R_z$  со средним напряжением  $U_{сп}$  и средней силой тока  $I_{сп}$ , при которых происходит пробой диэлектрика, а также частотой  $f$  импульсов питающего напряжения [1]

$$R_z \approx C_r \left( \frac{U_{сп} I_{сп}}{f} \right)^\tau, \quad (1)$$

где  $C_r$  – коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал,  $\tau$  – показатель степени.

Обзор литературы технических характеристик отечественных и зарубежных электроэрозионных станков позволяет сделать вывод, что для прецизионной обработки величина межэлектродного зазора  $u$  не превышает 0,01 мм. Копировально-прошивочные электроэрозионные станки фирмы Sodick могут работать с межэлектродным расстоянием порядка 0,005 мм. Если учесть, что процесс электроэрозионной обработки возможен только в весьма ограниченном диапазоне значений  $u$ , то возникает проблема точного позиционирования электрода-инструмента. Исследования автора [2] позволяют сделать вывод, что одним из способов решения этой задачи является разработка более совершенных систем автоматического управления (САУ) процессом ЭЭО.

В настоящее время в электроэрозионных станках используются электрогидравлические и электромеханические системы управления величиной межэлектродного зазора. Электрогидравлические САУ позволяют развивать наибольшие тяговые усилия (что немаловажно при обработке электродами большой массы), но проигрывают электромеханическим системам управления по точности и быстродействию. Этот факт объясняется наличием в электрогидравлических приводах большого числа промежуточных элементов между устройством управления и исполнительным гидроцилиндром. Последовательное многократное преобразование энергии в элементах гидравлической части системы управления приводит к неизбежным потерям, расширению зоны нечувствительности исполнительного органа, вследствие чего энергетические показатели типовых электрогидравлических САУ заметно уступают, например, безредукторным линейным электромагнитным приводам. Однако электрогидравлические САУ в несколько раз дешевле типовых электромеханических, и почти на порядок дешевле линейных электромагнитных систем управления.

Исходя из того состояния, в котором находится современное отечественное машиностроение, весьма актуальной является задача максимального повышения показателей качества технологического оборудования, при минимальном вмешательстве в конструкцию (т.е. наименьших затратах на модернизацию).

Автором предлагается многоконтурная электрогидравлическая система автоматического управления [3], которая состоит из двух контуров стабилизирующих межэлектродный зазор: основного и корректирующего. Схема рассматриваемой САУ приведена на рис. 1. На рис. обозначены: БУ – блок управления; ОСП – обратная связь по положению; ЭУ – электронный усилитель; ЭМП – электромеханический преобразователь; ГУЭ – гидравлический усилительный

элемент; ГЦ – гидроцилиндр; КЭУ – корректирующий электронный усилитель; КМЭМП – корректирующий магнитоэлектрический преобразователь.

Основной контур представляет собой типовой электрогидравлический привод с гидравлическим усилительным элементом «сопл – заслонка – золотник». При подаче сигнала управления  $U_{\text{упр.осн}}$  через электронный усилитель ЭУ на электромеханический преобразователь ЭМП происходит смещение  $h$  заслонки относительно сопла и изменяется перепад давлений по торцам управляющего золотника. Следящий золотник смещается на величину  $x$  и меняет расход жидкости  $Q_{\text{ГУЭ}}$ , поступающей в полости исполнительного гидроцилиндра, из-за чего происходит перемещение штока исполнительного гидроцилиндра. Для разгрузки штока гидроцилиндра от сил трения последний установлен в двух гидростатических опорах. Вместе со штоком перемещается и электрод-инструмент, изменяя величину межэлектродного зазора на величину  $y_{\text{осн}}$ .

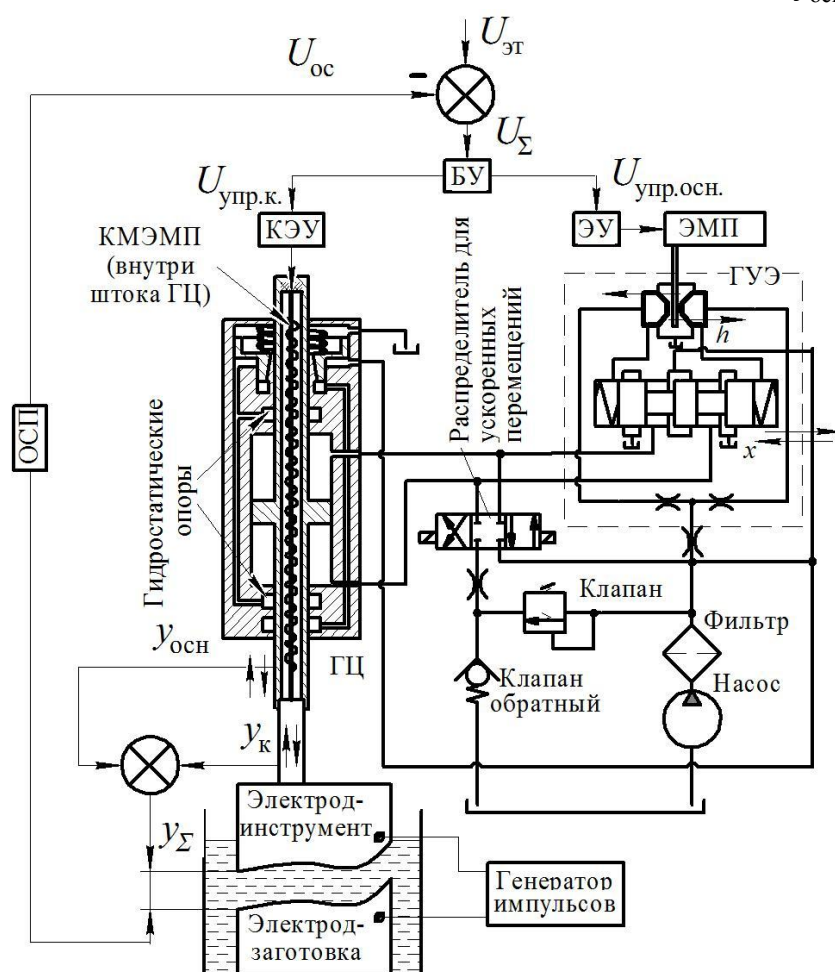


Рисунок 1 – Гидравлическая схема многоконтурной САУ

В электроэрозионных станках с электрогидравлическим приводом (например, 4К722АФ1) сквозь шток гидроцилиндра пропускается тяга, на которой закрепляется электрод-инструмент. Тяга представляет собой шпильку с двумя резьбовыми концами, один из которых крепится на верхнем конце штока, не позволяя тяге выпасть из отверстия, а на втором конце закреплен электрод-инструмент.

Поскольку тяга изготовлена из обычной стали, то ее вполне можно заменить магнитострикционным элементом из ферромагнитного сплава, например пермендюра.

Магнитострикционный эффект – это изменение размеров и формы магнитострикционного элемента под действием магнитного поля. Магнитострикционный преобразователь корректирующего контура, показанный на рис. 2, состоит из исполнительного элемента и установленной на нем обмотки, которые размещены внутри штока гидроцилиндра ГЦ (на рис. 2 – преобразователь расположен горизонтально, а шток не показан).

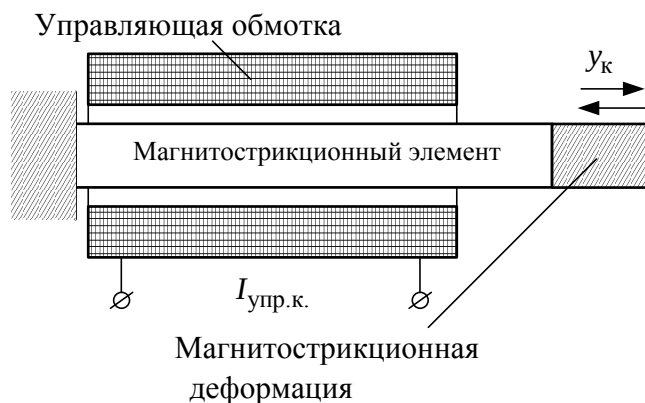


Рисунок 2 – Магнитострикционный преобразователь

Магнитострикционный элемент неподвижно закреплен в верхней части штока гидроцилиндра ГЦ, а в нижней части к нему присоединена втулка, сопряженная со штоком по посадке с зазором, дающая возможность (при подаче тока  $I_{упр.к}$  на обмотку преобразователя) выдвигаться из штока вместе с электродом-инструментом на величину  $Y_k$ .

В отличие от основного, корректирующий контур непосредственно преобразует подводимую электрическую энергию в механическое перемещение электрода-инструмента, что позволяет исключить промежуточные элементы. Следовательно, становятся возможными высокоточные перемещения рабочего органа внутри зоны нечувствительности электрогидравлического контура. При этом вмешательство в конструкцию базовой модели САУ минимально.

Результирующее перемещение объекта регулирования  $Y_{\Sigma}$  определяется как сумма перемещения штока гидроцилиндра  $Y_{осн}$  и деформации  $Y_k$  магнитострикционного элемента.

Математическое описание основного контура предлагаемой САУ представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих движение входящих в его состав элементов:

– уравнение электронного усилителя

$$U_{упр.осн} = U_{\Sigma} \cdot K_R, \quad (2)$$

где  $K_R$  – коэффициент усиления,  $U_{\Sigma}$  – сигнал рассогласования;

– уравнение движения электромеханического преобразователя, перемещающего заслонку на величину  $h$

$$T_{\text{эмп}2}^2 \cdot \frac{dh^2}{dt^2} + T_{\text{эмп}1} \cdot \frac{dh}{dt} + 1 = K_{\text{эмп}} \cdot U_{\text{упр.осн}}, \quad (3)$$

где  $T_{\text{эмп}1}, T_{\text{эмп}2}, K_{\text{эмп}}$  – постоянные времени и коэффициент усиления электромеханического преобразователя, соответственно;

– уравнение движения следящего золотника гидравлического усилительного элемента, при условии, что его масса не влияет на динамику звена:

$$\left( \frac{S_3^2}{K_{Qp}(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})} + \frac{V_{\text{сж}}}{2E \cdot K_{Qp}} \right) \frac{dx}{dt} + 1 = \frac{p_{\text{п}} \cdot S_3}{h(C_{\text{пр}} + C_{\text{гд}})}, \quad (4)$$

где  $S_3$  – площадь торца золотникового элемента,  $V_{\text{сж}}$  – объем сжимаемой жидкости при приведенном объемном модуле  $E$  упругости жидкости,  $K_{Qp}$  – коэффициент усиления по давлению,  $C_{\text{гд}}, C_{\text{пр}}$  – жесткость гидродинамической пружины и центрирующих пружин,  $p_{\text{п}}$  – давление питания золотника, соответственно;

– уравнение расхода рабочей жидкости через ГУЭ

$$Q_{\text{гуэ}} = K_{Qx} \cdot x, \quad (5)$$

где  $K_{Qx}$  – коэффициент усиления ГУЭ по расходу;

– уравнение расхода исполнительного гидроцилиндра САУ

$$S_{\text{п}} \cdot \frac{dp}{dt} = Q_{\text{гуэ}}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{п}}$  – площадь поршня гидроцилиндра,  $p$  – перепад давления в полостях гидроцилиндра;

– уравнение сил, действующих на поршень гидроцилиндра, при отсутствии нагрузки

$$(M + M_{\text{пр}}) \cdot \frac{d^2 y_{\text{осн}}}{dt^2} + f_{\text{вт}} \cdot \frac{dy_{\text{осн}}}{dt} = p \cdot S_{\text{п}}, \quad (7)$$

где  $M_{\text{пр}}$  – приведенная масса жидкости в линиях гидроцилиндра;  $M$  – масса штока гидроцилиндра и объекта регулирования;  $f_{\text{вт}}$  – коэффициент вязкого трения.

Математическая модель корректирующего контура состоит всего из двух уравнений:

– уравнение корректирующего электронного усилителя

$$U_{\text{упр.к}} = I_{\text{упр.к}} \cdot K_{\text{эу.к}}, \quad (8)$$

где  $I_{\text{упр.к}}$  – напряжение корректирующего магнитоэлектрического преобразователя,  $K_{\text{эу.к}}$  – коэффициент усиления;

– уравнение движения корректирующего магнитоэлектрического преобразователя

$$T_{\text{мэмп}2}^2 \cdot \frac{dy_{\text{к}}^2}{dt^2} + T_{\text{мэмп}1} \cdot \frac{dy_{\text{к}}}{dt} + 1 = K_{\text{мэмп}} \cdot U_{\text{упр.к}}, \quad (9)$$

где  $T_{\text{мэмп}1}, T_{\text{мэмп}2}, K_{\text{мэмп}}$  – постоянные времени и коэффициент усиления электромеханического преобразователя, соответственно.

Уравнения, увязывающие между собой контуры управления:

– уравнение движения объекта регулирования

$$y_{\Sigma} = y_{\text{осн}} + y_{\text{к}}; \quad (10)$$

– уравнение обратной связи

$$U_{\text{ос}} = K_{\text{ос}} \cdot y_{\Sigma}, \quad (11)$$

где  $K_{\text{ос}}$  – коэффициент усиления обратной связи;

– уравнение замыкания САУ

$$U_{\Sigma} = U_{\text{эт}} - U_{\text{ос}}, \quad (12)$$

где  $U_{\text{эт}}$  – эталонное напряжение;  $U_{\text{ос}}$  – напряжение обратной связи (фактическое среднее напряжение пробоя на межэлектродном зазоре).

Пусть величина рассогласования такова, что рабочее перемещение не может быть отработано основным контуром (например, шток гидроцилиндра должен переместиться на величину, находящуюся в пределах собственной зоны нечувствительности). В этом случае величина рассогласования  $U_{\Sigma}$  от блока управления поступает на вход корректирующего электронного усилителя и далее передается на обмотку магнитострикционного преобразователя, который осуществляет высокоточное перемещение объекта регулирования. Как только величина рассогласования становится достаточной, чтобы ее отработал основной контур, управление передается ему. Такой алгоритм работы позволяет осуществлять выборку малых зазоров с точностью, которую не может обеспечить электрогидравлический привод основного контура.

Система уравнений (2)–(12) представляет собой математическую модель многоконтурной САУ. Решение этих уравнений позволяет получить передаточную функцию системы управления и построить ее статические и динамические характеристики с учетом числового значения входящих величин, приведенных в работе [2].

Для подтверждения работоспособности системы управления автором проводились экспериментальные исследования многоконтурной САУ для типового электрода-инструмента массой 10 кг. Исследования проводились на установке, построенной на базе станка 4K722АФ1, при поддержке ООО НПП «Эталонпром».

Целью экспериментов было определение длительности переходного процесса в межэлектродном промежутке при использовании типовой и многоконтурной САУ. Материал электрода – медь, обрабатываемой заготовки – сталь 18ХГТ. Обработка велась на частоте следования импульсов 8 кГц, при токе 5 А. Регистрировалась величина среднего межэлектродного напряжения 60 В, которому соответствует рабочий зазор  $\delta = 0,05$  мм.

В ходе экспериментов контуры настраивались отдельно. При массе электрода инструмента 10 кг отработка перемещения 0,05 мм осуществлялась основным контуром с быстродействием  $t_{\text{пп}} = 0,027$  с, а корректирующим – за интервал времени  $t_{\text{пп}} = 0,008$  с.

При массе инструмента 30 кг длительность переходного процесса в корректирующем контуре уменьшилась до  $t_{\text{пп}} = 0,006$  с, в основном контуре возросла до  $t_{\text{пп}} = 0,035$  с. Это кажущееся противоречие (с увеличением нагрузки быстродействие МЭМП увеличилось) можно объяснить следующим образом. Известно, что основным фактором, ограничивающим скорость поворота доменов вдоль направления намагничивающего поля, является наличие внутреннего

трения и механических напряжений в материале магнитострикционного элемента. Поэтому создание механических напряжений с обратным знаком может повысить быстродействие корректирующего контура.

В качестве дальнейших направлений совершенствования многоконтурных электрогидравлических САУ можно ожидать такое изменение конструкции системы, при котором величина тепловых деформаций магнитострикционного элемента будет или компенсироваться, или хотя бы частично уменьшаться за счет охлаждения. Дело в том, что поскольку обмотка преобразователя находится в замкнутом объеме, она сильно нагревается, что провоцирует дрейф рабочей точки магнитострикционного элемента, обусловленный тепловыми деформациями.

На основании проведенных исследований можно сделать следующий вывод. Использование корректирующих контуров, построенных на базе магнитострикционных преобразователей, позволяет повысить быстродействие и точность электрогидравлических систем управления межэлектродным зазором при минимальном вмешательстве в конструкцию электроэрозионного станка.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сариллов М.Ю. *Электроэрозионная обработка деталей*. – Комсомольск-на-Амуре : Изд-во КНАГТУ, 2003. – 79 с.
2. Волков П.Ю. *Повышение качества электрогидравлических систем автоматического управления промышленным оборудованием* : Дисс. ...канд. техн. наук, спец. 05.13.06, 05.13.05. – Пенза, 2009. – 223 с.
3. Волков П.Ю. *Повышение качества электрогидравлических систем автоматического управления с помощью корректирующих магнитострикционных преобразователей* // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. – 2013. – № 1 (5). – С. 137–141.

УДК 677.21:62

#### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОТБОРА ВОЛОКНА ИЗ КИП ХЛОПКА

© **В.В. Волков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **А.Д. Семёнов**, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)

© **Р.Ф. Сатаева**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### OPTIMIZATION OF PROCESS OF SELECTION OF FIBRE FROM STACKS OF COTTON

© **V.V. Volkov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **A.D. Semenov**, Penza State University (Penza, Russia)

© **R.F. Sataeva**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В работе была сделана попытка решить задачу управления величиной снимаемой массы; задачу управления производительностью; задачу управления мощностью, потребляемой приводом разрыхляющих барабанов.

**Ключевые слова:** кипа, хлопковое волокно, модель процесса отбора, оптимизация, уравнение регрессии, нелинейное программирование.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОТБОРА ВОЛОКНА ИЗ КИП ХЛОПКА

In-process ball given it a shoot to decide a management task the size of the taken off mass; management task by the productivity; management task by the power consumed by the drive of opener drums.

**Key words:** Stack, linter, model of process of selection, optimization, equalization of regression, the nonlinear programming.

Оптимизация проводилась на модели процесса отбора волокна из кип. При построении модели использовалась теория планирования эксперимента [1]. Был проведён трехкратно продублированный полнофакторный эксперимент  $3^2$  [2].

В процессе эксперимента варьировались управляющие переменные процесса верхнего отбора, а именно скорость обработки  $\omega$ , скорость подачи  $V$ , глубина обработки  $h$ , и контролировались средние значения мощности  $P_{cp}$ , производительности процесса  $Q_{cp}$  и массы волокна  $M$ , снимаемой за один проход кипного питателя.

Результаты эксперимента сведены в таблицу 1.

Таблица 1

| № | $h$ | $V$   | $n$    | $P_{cp}$ |      |      | $M$ |     |     | $Q_{cp}$ |      |      |
|---|-----|-------|--------|----------|------|------|-----|-----|-----|----------|------|------|
|   | мм  | м/мин | об/мин | Вт       |      |      | гр  |     |     | кг/ч     |      |      |
| 1 | 2   | 5     | 900    | 450      | 320  | 460  | 145 | 126 | 152 | 218      | 189  | 228  |
| 2 | 7   | 5     | 900    | 580      | 560  | 700  | 267 | 257 | 244 | 401      | 386  | 366  |
| 3 | 2   | 10    | 900    | 440      | 510  | 490  | 154 | 152 | 148 | 462      | 456  | 448  |
| 4 | 7   | 10    | 900    | 650      | 740  | 600  | 390 | 365 | 384 | 1170     | 1095 | 1151 |
| 5 | 2   | 5     | 1200   | 270      | 380  | 400  | 105 | 105 | 142 | 128      | 158  | 213  |
| 6 | 7   | 5     | 1200   | 1100     | 980  | 1140 | 394 | 391 | 446 | 590      | 587  | 669  |
| 7 | 2   | 10    | 1200   | 310      | 310  | 470  | 112 | 158 | 146 | 436      | 474  | 437  |
| 8 | 7   | 10    | 1200   | 1180     | 1240 | 1140 | 435 | 496 | 459 | 1305     | 1388 | 1377 |

По экспериментальным данным рассчитаны коэффициенты регрессии, значения которых представлены в таблице 2.

Таблица 2

| № | Y  | Ед. изм | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ | $b_{12}$ | $b_{13}$ | $b_{23}$ | $b_{123}$ |
|---|----|---------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|-----------|
| 1 | Q  | кг/час  | 579   | 277   | 253   | 50    | 121      | 63       | 3        | -7        |
| 2 | tq | -       | 109   | 50    | 46    | 9     | 22       | 11       | 0,6      | -1,2      |
| 3 | P  | Вт      | 643   | 242   | 31    | 101   | 10       | 145      | 1        | 15        |
| 4 | tp | -       | 77    | 29    | 4     | 12    | 1        | 17       | 0,1      | 2         |
| 5 | M  | кг      | 257   | 120   | 26    | 25    | 18       | 34       | -7       | -10       |
| 6 | tm | -       | 60    | 28    | 6     | 6     | 4        | 8        | -2       | -2        |

В чётных строках таблицы приведены расчётные значения критерия Стьюдента, позволяющие оценить значимость коэффициентов регрессии путем сравнения с табличным значением  $t = 2,365$ .

По уравнениям регрессии для среднего значения мощности  $P_{cp}$ , производительности процесса  $Q_{cp}$  и массы волокна  $M$  были рассчитаны оптимальные значения управляющих переменных процесса верхнего отбора, а именно скорость обработки  $\omega_o$ , скорость подачи  $V_o$ , глубина обработки  $h_o$ .

Исходная постановка задачи оптимизации сформулирована как задача нелинейного программирования. Требуется найти такие значения управляющих переменных  $h_o$ ,  $V_o$ , и  $\omega_o$ , которые обеспечивали бы минимум потребления энергии при условии, что производительности и снимаемая масса принимают заданные значения.

$$\begin{cases} P_{\text{ср}}(h, V, \omega) - \min; \\ Q_{\text{ср}}(h, V, \omega) = Q_0; \\ M(h, V, \omega) = M_0; \\ 0 < h < h_m; \\ 0 < V < V_m; \\ 0 < \omega < \omega_m. \end{cases} \quad (1)$$

В такой постановке имеем задачу нелинейного программирования, методы решения которой можно разделить на три основные группы: симплекс-метод, градиентные методы и специальные методы ветвей и границ [3].

Принимая во внимание, что размерности векторов, регулируемых и регулирующих параметров одинаковы, воспользуемся для решения поставленной задачи модифицированным методом границ. Этот метод менее чувствителен к виду нелинейных зависимостей (1) и имеет гарантированную сходимость [4].

Был предложен следующий алгоритм реализации этого метода:

1. Для заданных значений  $Q_0$  и  $M_0$  сканируют величину мощности  $P$ .
2. Для каждого значения мощности решают систему нелинейных уравнений (1) и находят значения  $h_o$ ,  $V_o$ , и  $\omega_o$ , удовлетворяющие заданным значениям  $P_0$ ,  $Q_0$  и  $M_0$ .
3. Проверяют условие попадания регулирующих величин  $h_o$ ,  $V_o$ , и  $\omega_o$ .
4. Если условие 2 не выполняется, то этот случай отбрасывают из рассмотрения.
5. Из оставшихся значений  $P_i$  выбирают минимальное, которое и будет искомым оптимальным значением с точностью до выбранного шага дискретности сканирования.

Результаты решения исходной оптимизационной задачи представлены в таблице 3.

Таблица 3

| № | М  | $Q_{\text{ср}}$ | $P_{\text{ср}}$ | $h_o$ | $V_o$ | $\omega_o$ |
|---|----|-----------------|-----------------|-------|-------|------------|
|   | кг | кг/час          | Вт              | мм    | м/мин | об/мин     |
| 1 | 2  | 300             | 520             | 4,4   | 5,0   | 922        |
| 2 | 2  | 400             | 510             | 3,8   | 6,4   | 918        |
| 3 | 2  | 500             | 510             | 3,4   | 8,1   | 914        |
| 4 | 3  | 600             | 670             | 7,0   | 6,3   | 929        |
| 5 | 3  | 800             | 610             | 5,9   | 8,6   | 904        |
| 6 | 3  | 900             | 600             | 5,3   | 10    | 901        |
| 7 | 4  | 1000            | 950             | 6,9   | 8,2   | 1087       |
| 8 | 4  | 1100            | 890             | 6,9   | 9,1   | 1041       |

Программа расчёта оптимальных значений управляющих переменных  $h_o$ ,  $V_o$ , и  $\omega_o$  по предложенному алгоритму приведена в приложении.

По данным таблицы 3 построены графики зависимости  $h_o = f(M, Q)$  (рис. 1),  $V_o = f(M, Q)$  (рис. 2),  $\omega_o = f(M, Q)$  (рис. 3).



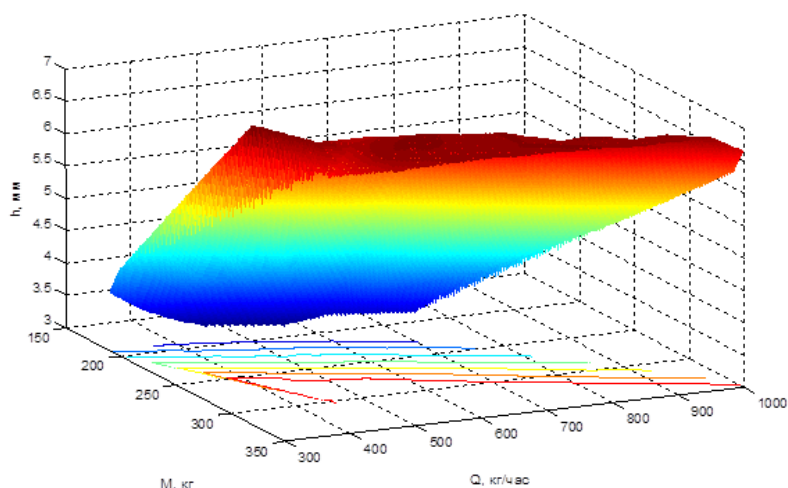


Рисунок 1 – Зависимость оптимальной глубины обработки от снимаемой массы и производительности

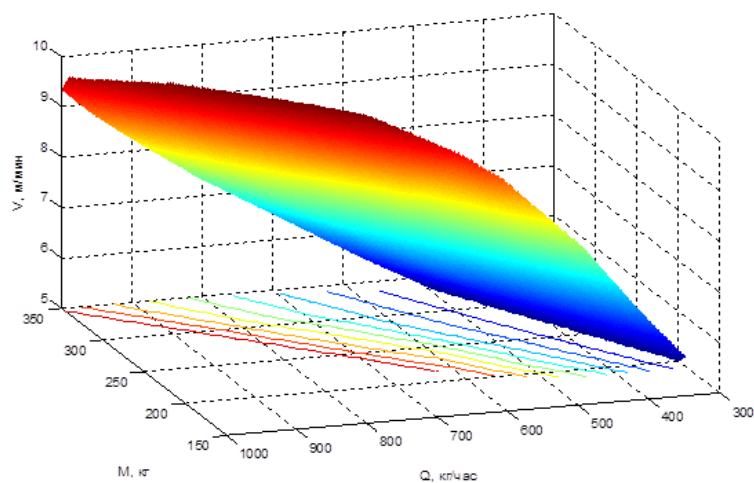


Рисунок 2 – Зависимость оптимальной скорости подачи от снимаемой массы и производительности

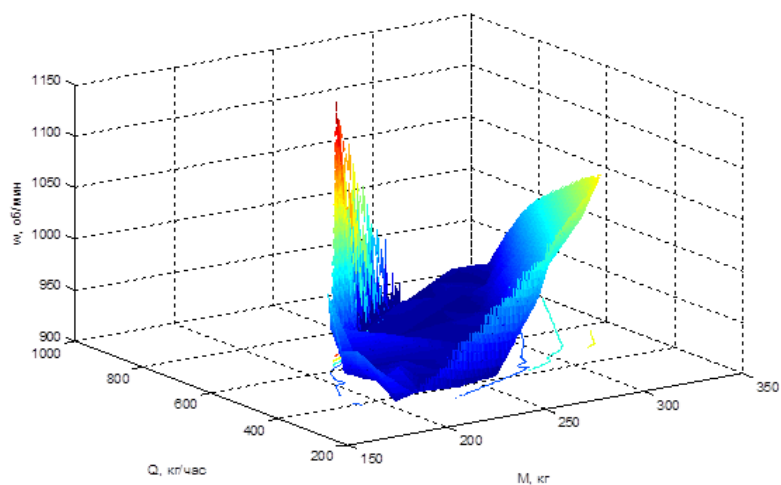


Рисунок 3 – Зависимость оптимальной скорости обработки от снимаемой массы и производительности

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что исходом задачи управления может быть декомпозирована на три практически независимые задачи:

1. Задачу управления величиной снимаемой массы  $M$ , решаемую путем регулирования глубины погружения  $h$  отбирающего узла питателя в ставку кип.
2. Задачу управления производительностью  $Q$ , решаемую путем регулирования скорости перемещения  $V$  питателя над ставкой кип.
3. Задачу управления мощностью  $P$ , потребляемой приводом рыхлящих барабанов, решаемую путем регулирования частоты их вращения  $\omega$ .

Графическое представление результатов показывает, что оптимальные значения  $V_o$ ,  $\omega_o$ ,  $h_o$  находятся внутри области их допустимых значений. Оптимизация процесса верхнего отбора волокна из кип с помощью кипного питателя по критерию минимума энергетических затрат позволяет не только декомпозировать исходную многосвязную задачу управления, но и повышает запас устойчивости системы в окрестности рассчитанной рабочей точки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Основы научных исследований : Учебник для технических вузов / В.И. Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов [и др.]; Под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. – М. : Высшая школа, 1989. – 400 с.
2. Волков В.В. Математическая модель взаимодействия рабочих органов текстильных машин разрыхлительно-трепального агрегата с обрабатываемой средой / Волков В.В., Семёнов А.Д. // Изв. ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2000. – № 3. – С. 97–99.
3. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1988. – 488 с.
4. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. – Т. 1. – М. : Энергия, 1976. – 503 с.

УДК 681.5

#### КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТИПА СОПЛО – ЗАСЛОНКА

© Н.А. Симанин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© И.А. Поляков, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### COEFFICIENT OF EFFICIENCY OF THE HYDRAULIC MEASURING CONVERTER OF A FLAPPER-NOZZLE TYPE

© N.A. Simanin, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© I.A. Polyakov, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В статье приведена методика расчета коэффициента полезного действия оригинального гидравлического измерительного преобразователя вращающего момента типа сопло – заслонка, разработанного для систем автоматического регулирования приводов промышленного оборудования.

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, вращающий момент, сопло – заслонка, коэффициент полезного действия, давление, расход.

In the article the authors give the coefficients of efficiency design procedures on pressure and expense of the original hydraulic measuring torque converter of a flapper-nozzle type developed for industrial equipment drives automatic control systems.

**Key words:** measuring converter, torque, flapper-nozzle, coefficient of efficiency, pressure, the expense.

**E-mail:** nsimanin@mail.ru; dionisiw@mail.ru

В системах автоматического регулирования и управления приводах промышленного оборудования для контроля и измерения параметров технологического процесса и состояния самого оборудования используют самые разнообразные измерительные преобразователи (датчики), принцип действия которых основан на различных физических эффектах. В большинстве схем и конструкций таких датчиков происходят преобразования сигнала из одного вида энергии в другой. Причем сигнал на выходе датчика обычно требует значительного усиления по мощности, а зачастую и дополнительного преобразования по форме, виду и т.д.

Метрологические и технические характеристики датчиков, выходной сигнал которых напрямую не используют для управления исполнительными механизмами, не содержат такого показателя, как коэффициент полезного действия. Считают, что энергия, подведенная к датчику, расходуется на его работу и теряется безвозвратно, а КПД на всех режимах работы равен нулю.

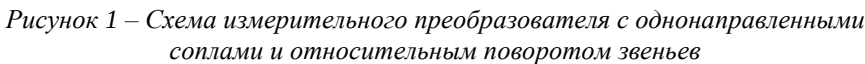
Однако в целом ряде случаев, например в механических и гидравлических измерительных преобразователях, выходной сигнал может оказаться достаточным по мощности для прямого регулирования. При этом часть подведенной к датчику энергии полезно используется для приведения в действие исполнительного механизма системы автоматического регулирования или управления. Для таких измерительных преобразователей анализ соотношения полезной энергии (мощности) к потребляемой позволяет судить о совершенстве схемы и конструкции датчика, а также проводить сравнение различных конструкций датчиков между собой.

В данной работе приведена методика расчета коэффициента полезного действия оригинального гидравлического измерительного преобразователя вращающего момента типа сопло – заслонка, разработанного для систем автоматического регулирования приводов промышленного оборудования.

Разработка и совершенствование систем автоматического управления гидравлическими приводами промышленного оборудования требует создания измерительных преобразователей, использующих единую с приводом рабочую среду (жидкость) и обладающих заданными статическими и динамическими характеристиками. Анализ известных технических решений показал, что наиболее приемлемыми могут стать преобразователи, созданные на базе гидравлических усилителей, в частности типа сопло – заслонка [1, с. 6; 2, с. 43; 3, 4].

Усилители сопло – заслонка могут создаваться по полумостовой или мостовой схеме, причем мостовая схема является предпочтительной, так как обеспечивает больший по мощности выходной сигнал, который можно напрямую (без дополнительного усиления) использовать для приведения в действие исполнительного механизма системы автоматического регулирования или управления.

На рис. 1 приведена обобщенная конструктивная схема измерительных преобразователей вращающего момента с однонаправленными соплами и относительным поворотом звеньев.



Регулировочная характеристика по давлению  $\Delta p_{\text{ин}}(\varphi)$  измерительного преобразователя вращающего момента с относительным поворотом звеньев имеет вид [5, с. 90]

$$\Delta p_{\text{III}} = p_1 - p_2 = p_{\text{II}} \left[ \frac{1}{1 + \left( 1 - \frac{R \sin \varphi}{x_0} \right)^2} - \frac{1}{1 + \left( 1 + \frac{R \sin \varphi}{x_0} \right)^2} \right]. \quad (1)$$

Если предположить, что после поворота заслонки (рис. 1) исполнительный механизм ИМ примет новое положение равновесия и установится равенство давлений  $p_1 = p_2 = p_{\text{п}}/2$ , то расход жидкости в диагонали моста, определяю-

щий скорость движения исполнительного механизма ИМ из нейтрального положения, можно определить по формуле

$$Q_{\text{ИП}} = Q_5 + Q_6 = \frac{1}{2}(Q_4 - Q_3) \quad (2)$$

или

$$Q_{\text{ИП}} = \mu_c \pi d_c \sqrt{\frac{p_n}{\rho}} \cdot R \sin \varphi, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $d_c$  – диаметр отверстия сопла.

Уравнение (3) представляет собой *регулирующую характеристику по расходу*  $Q_{\text{ИП}}(\varphi)$  измерительного преобразователя, которая показывает зависимость расхода жидкости в диагонали моста от угла поворота сопел относительно заслонки. Следует отметить, что расход жидкости в диагонали моста в первую очередь определяет быстродействие исполнительного механизма автоматического регулятора системы управления.

*Обобщенная статическая характеристика*  $Q_{\text{ИП}}(\Delta p_{\text{ИП}}, \varphi)$  измерительного преобразователя связывает расход жидкости  $Q_{\text{ИП}}$  в диагонали моста, перепад давлений  $\Delta p_{\text{ИП}} = p_1 - p_2$  под торцами исполнительного механизма ИМ и угол  $\varphi$  поворота заслонки

$$Q_{\text{ИП}} = b x_0 \sqrt{\frac{p_n}{\rho}} \left[ \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{\text{ИП}}}{p_n}} - \left( 1 - \frac{R \sin \varphi}{x_0} \right) \sqrt{1 + \frac{\Delta p_{\text{ИП}}}{p_n}} \right]. \quad (4)$$

После линеаризации уравнения (4), выполненной разложением правой части в ряд Маклорена вокруг нулевых значений и ограничение вторым членом разложения, получим

$$Q_{\text{ИП}} = Q_c \left( \frac{R \sin \varphi}{x_0} - \frac{\Delta p_{\text{ИП}}}{p_n} \right), \quad (5)$$

где  $Q_c = \mu \pi d_c x_0 \sqrt{\frac{p_n}{\rho}}$  – расход жидкости через одно сопло преобразователя при  $\varphi = 0$ .

Коэффициент полезного действия измерительного преобразователя определяется отношением полезно используемой мощности  $N_{\text{ИП}}$  к потребляемой мощности  $N_n$

$$\eta_{\text{ИП}} = \frac{N_{\text{ИП}}}{N_n} = \frac{Q_{\text{ИП}} \Delta p_{\text{ИП}}}{Q_n p_n}. \quad (6)$$

Используя линеаризованное уравнение (5) для определения расхода жидкости в диагонали моста измерительного преобразователя и считая расход жидкости на входе преобразователя  $Q_n = 2Q_c$ , выражение (6) можно преобразовать к виду

$$\eta_{\text{ИП}} = \frac{1}{2} \left( \frac{R \sin \varphi}{x_0} - \frac{\Delta p_{\text{ИП}}}{p_n} \right) \frac{\Delta p_{\text{ИП}}}{p_n}. \quad (7)$$

Разность давлений в междроссельных камерах преобразователя с учетом формулы (1) определяется зависимостью

$$\Delta p_{\text{ип}} = p_1 - p_2 = \frac{4 \frac{R \sin \varphi}{x_0} p_{\text{п}}}{\left[ 1 + \left( 1 - \frac{R \sin \varphi}{x_0} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( 1 + \frac{R \sin \varphi}{x_0} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

или в безразмерном виде

$$\Delta \bar{p}_{\text{ип}} = \frac{4 \bar{x}}{\left[ 1 + (1 - \bar{x})^2 \right] \left[ 1 + (1 + \bar{x})^2 \right]}, \quad (9)$$

где  $\bar{x} = R \sin \alpha / x_0$  – относительное смещение заслонки;  $\Delta \bar{p}_{\text{ип}} = \Delta p_{\text{ип}} / p_{\text{п}}$  – относительная разность давлений в диагонали моста преобразователя.

Тогда формула (7) может быть преобразована к виду

$$\eta_{\text{ип}} = \frac{\Delta \bar{p}_{\text{ип}}}{2} (\bar{x} - \Delta \bar{p}_{\text{ип}}). \quad (10)$$

Анализ выражений (9) и (10) показывает, что КПД измерительного преобразователя возрастает с увеличением смещения заслонки из нейтрального положения и достигает максимального значения при  $\bar{x} = 1$ , то есть когда  $R \sin \alpha = x_0$ .

При неподвижном исполнительном элементе ИМ, когда  $\Delta \bar{p}_{\text{ип}} = 0$ , КПД измерительного преобразователя равен нулю. Еще одно нулевое значение КПД принимает при некоторой предельной относительной разности давлений в междроссельных камерах преобразователя  $\Delta \bar{p}_{\text{иппр}}$ , которую можно определить из условия  $\frac{\Delta \bar{p}_{\text{ип}}}{2} (\bar{x} - \Delta \bar{p}_{\text{ип}}) = 0$ .

В диапазоне значений  $0 < \Delta \bar{p}_{\text{ип}} < \Delta \bar{p}_{\text{иппр}}$  КПД преобразователя достигает максимума, который можно определить из формулы (10), приравняв нулю первую производную  $\partial \eta_{\text{ип}} / \partial \Delta \bar{p}_{\text{ип}}$ , что соответствует  $\Delta \bar{p}_{\text{ип}} = \bar{x}^2 / 2$ . Максимальная величина КПД преобразователя составит  $\eta_{\text{ип}} = \bar{x}^2 / 8$ .

По максимальному значению КПД определяют оптимальные режимы работы измерительного преобразователя и гидравлического привода машины в целом.

Работа преобразователя и привода машины на оптимальных режимах необходима не только для обеспечения наибольшей эффективности эксплуатации оборудования, но и для проведения сравнительной оценки характеристик аналогичных устройств и приводов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симанин Н.А., Голубовский В.В. Гидравлические системы автоматического управления технологическими операциями в машиностроении. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2009. – 155 с.
2. Симанин Н.А., Поляков И.А. Преобразователи вращающего момента для систем управления гидравлическими приводами // Современные технологии в машиностроении : сб. статей XVI Международной научно-практической конференции (Пенза, декабрь 2012). – Пенза : ПДЗ, 2012. – С. 43–45.
3. Патент № 124388 РФ на полезную модель. Измерительный преобразователь вращающего момента / Н.А. Симанин, С.Н. Симанин, И.А. Поляков. – Опубл. 20.01.2013; Бюл. № 2.

4. Патент № 127460 РФ на полезную модель. Измерительный преобразователь вращающего момента / Н.А. Симанин, С.Н. Симанин, И.А. Поляков. – Оpubл. 27.04.2013; Бюл. № 12.

5. Симанин Н.А., Поляков И.А. Расчет статической характеристики гидравлического измерительного преобразователя вращающего момента // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4(24). – С. 84–92.

УДК 681.5+697

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ, РЕКУРРЕНТНЫЙ, ШАГОВЫЙ АЛГОРИТМ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОДАЧИ ВОЗДУХА В ТОПКУ

© И.И. Коновалова, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

© А.Д. Семёнов, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)

© Н.К. Пакулова, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

## FAST-ACTING, RECURRENT, FOOT-PACE ALGORITHM OF EXTREME REGULATOR OF SERVE OF AIR IN HEATING

© I.I. Konovalova, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© A.D. Semenov, Penza State University (Penza, Russia)

© N.K. Pakulova, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В современной теории автоматического управления одним из важнейших разделов являются поисковые системы автоматической оптимизации, которые базируются на использовании алгоритмов импульсных помехозащитных быстродействующих систем для управления инерционными объектами.

**Ключевые слова:** система автоматической оптимизации, теория автоматического управления, алгоритм, идентификация, модель объекта, рекуррентный метод наименьших квадратов.

In the modern theory of automatic control one of major divisions is searching systems of automatic optimization, that are based on the use of algorithms of the impulsive помехозащитных fast-acting systems for a management by inertia objects.

**Key words:** system of automatic optimization, theory of automatic control, algorithm, authentication, model of object, recurrent method of the least

В настоящее время теория и практика поисковых систем автоматической оптимизации (САО) является одним из классических разделов современной теории автоматического управления [1]. Важное место в теории САО занимают алгоритмы импульсных (шаговых) помехозащищенных быстродействующих систем для управления инерционными объектами (энергетическими и химическими установками, ракетными двигателями и т.п.). Их математическая модель может быть представлена в виде последовательного соединения статической экстремальной зависимости с априори неизвестным ее видом и инерционной части, описываемой обыкновенным линейным дифференциальным уравнением с неизвестными нестационарными коэффициентами [2].

Основная проблема при реализации таких алгоритмов в реальном времени заключается в обеспечении устойчивости вычислений решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) при идентификации.

Предлагается решать СЛАУ и усреднять результаты вычислений на основании рекуррентного метода наименьших квадратов (РМНК) [3]. Эффективность предложенного алгоритма оптимизации исследуется методом статистических испытаний.

Рассмотрим модель объекта, которая состоит из последовательно соединенных: экстремального звена (нелинейная часть) с априори неизвестной характеристикой

$$u = f(x), \quad (1)$$

звена чистого запаздывания с известной величиной запаздывания  $\tau$  и линейной части, описываемой разностным уравнением  $n$ -го порядка с соответствующими начальными условиями и коэффициентами, зависящими от времени:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i(k)y(k-i) + \sum_{j=1}^m b_j(k)u(k-j-s) + e(k), \quad (2)$$

где  $y(k)$  – выход модели (временного ряда) в  $k$ -й момент времени;  $e(k)$  – последовательность независимых, одинаково распределенных случайных величин с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией (белый шум);  $\{a_i(k), i = 1, n\}$  – параметры авторегрессии;  $\{b_j(k), j = 1, m\}$  – параметры скользящего среднего;  $s$  – дискретное запаздывание.

Предполагается, что канал измерения выхода объекта находится под воздействием помехи  $e(k)$ , которая является центрированным случайным процессом.

Если в  $k$ -й момент времени изменить входную величину модели на  $\Delta x(k) = x(k) - x(k-1)$ , то через некоторое время, определяемое запаздыванием  $s$  и временем переходного процесса  $d$ , на выходе появится отклик  $\Delta y(k+s+d) = y(k+s+d) - y(k+s+d-1)$ . Величину этого отклика можно считать, решив совместно уравнения (1) и (2).

Неизвестные параметры уравнений можно определить, используя рекуррентную процедуру метода наименьших квадратов (РМНК), линеаризуя  $f(x)$  в окрестности параметров текущего  $k$ -го шага.

Алгоритм РМНК может быть представлен в следующем виде:

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + \gamma(k)e(k+1), \quad (3)$$

$$\gamma(k) = \mu(k+1)\mathbf{P}(k)\Phi(k+1), \quad (4)$$

$$\mathbf{e}(k+1) = y(k+1) - \Psi^T(k+1)\hat{\theta}(k), \quad (5)$$

где  $\hat{\theta}(k-1) = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]$  – вектор параметров модели;  $\Psi^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-d-1), \dots, u(k-d-m)]$  – вектор данных;

$\mu(k+1) = \frac{1}{1 + \Psi^T(k+1)\mathbf{P}(k)\Psi(k+1)}$  – вектор коррекции;  $\mathbf{P}(k) = \frac{1}{[\Psi^T(k)\Psi(k)]}$  – ве-

совая матрица;  $\mathbf{P}(k+1) = [\mathbf{I} - \gamma(k)\Psi^T(k+1)]\mathbf{P}(k)$  – весовая матрица, рассчитанная на следующем шаге;  $\Phi(k+1) = \Psi(k+1)$ ;  $\hat{\theta}(0) = 0$ ;  $\mathbf{P}(0) = \alpha\mathbf{I}$  – начальные значения переменных.

Алгоритм САО ускоренного поиска экстремума статической характеристики инерционного объекта, в котором используется прогнозирование установившегося значения переходного процесса (2) по измерениям  $y(k)$  с использованием рекуррентной процедуры (3) – (5), имеет вид

$$\Delta x(k+1) = h \cdot \text{sign}[\Delta y(k+1) \cdot \Delta x(k)]. \quad (6)$$

При технической реализации алгоритма на средствах микропроцессорной техники в случаях, которые характеризуются значительным уровнем возмущений, возникают трудности, обусловленные неустойчивостью (некорректностью) вычисления  $\Delta y(k+1)$ . Как следствие неустойчивости, появляются ложные срабатывания САО, реализующей алгоритм (6), что иногда значительно затягивает процедуру автоматической оптимизации и уменьшает быстродействие системы [2]. При



этом важное значение имеет выбор шага поиска экстремума  $h$ . При малом шаге снижается быстродействие системы, при большом шаге возникают ложные срабатывания, вплоть до потери устойчивости, что, в конечном итоге, приводит к увеличению времени поиска экстремума и снижению быстродействия.

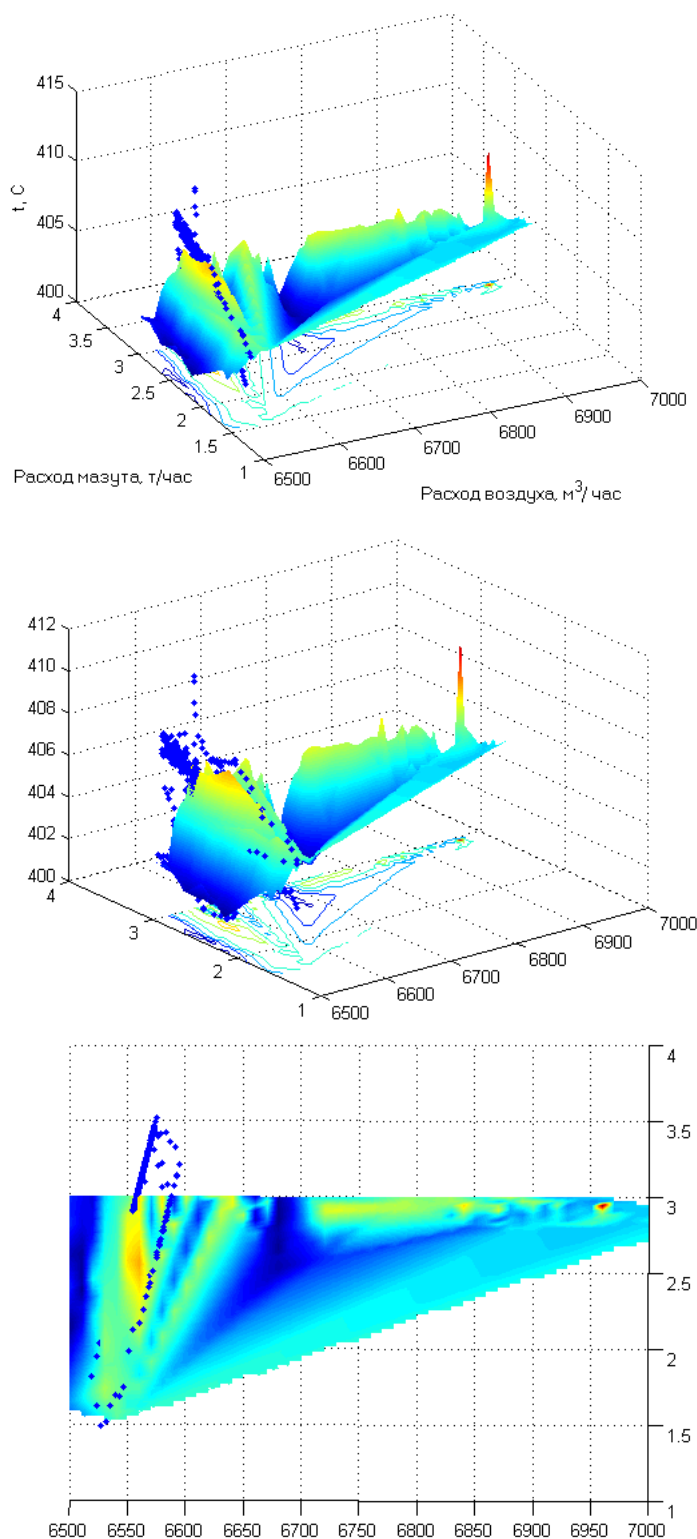


Рисунок 1 – Результат моделирования рекуррентного шагового алгоритма

На рис. 1 показаны результаты моделирования алгоритма (6). В процессе моделирования в результате многократного подбора был выбран шаг поиска, равный  $48,3 \text{ м}^3/\text{час}$ . Как видно из рисунка, использование разработанного алгоритма обеспечивает устойчивую работу системы в области максимальных значений температуры.

#### Выводы

1. Разработан алгоритм ускоренного поиска экстремума статической характеристики инерционного объекта, в котором используется прогнозирование установившегося значения переходного процесса по измерениям выхода с использованием рекуррентной процедуры метода наименьших квадратов.
2. Проведено моделирование работы алгоритма, подтвердившее устойчивую работу экстремальной системы при действии на нее помех в области максимальных значений целевой функции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Растринин Л.А. Системы экстремального управления. – М. : Наука, 1974. – 323 с.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егунова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 744 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М. : Мир, 1984. – 541 с.

УДК 676.1.02

#### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРОСВЕТА БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

© А.Д. Семёнов, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)

© С.В. Никулин, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)

© А.Н. Расстегаев, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)

#### DEVELOPMENT OF ALGORITHM OF EXTREME ADJUSTING OF UNEVENNESS OF ROAD CLEARANCE OF PAPER LINEN

© A.D. Semenov, Penza State University (Penza, Russia)

© C.V. Nikylin, Penza State University (Penza, Russia)

© A.N. Rasstegaev, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Получено экспериментальное подтверждение зависимости между соотношением скорости движения бумажной массы и скорости движения сеток бумагоделательной машины и среднеквадратичным отклонением веса бумажного полотна, которое определяет степень неравномерности просвета бумаги.

**Ключевые слова:** алгоритм, математическая модель объекта управления, экстремальное регулирование, бумажное полотно, бесконечная сетка, сеточный стол.

Experimental confirmation of dependence is got between correlation of rate of movement of paper mass and rate of movement of nets of papermaking machine and standard deviation of weight of paper linen that determines the degree of unevenness of road paper clearance.

**Key words:** algorithm, mathematical model of management object, extreme adjusting, paper linen, endless net, net table.

Бумажная масса поступает на бумагоделательную машину через напускное устройство в виде напорного ящика с воздушной подушкой.

Напускные устройства обеспечивают необходимую скорость потока бумажной массы, которая должна определенным образом соответствовать скорости движения сеток бумаго- и картоноделательных машин.

Соотношение между скоростью массы и скоростью сетки выражается формулой

$$K_M = \frac{v_M}{v_C}, \quad (1)$$

где  $v_M$  – скорость массы, поступающей на сетку, м/мин;  $v_C$  – скорость бесконечной сетки сеточного стола, м/мин.

При заметном превышении скорости массы по отношению к скорости сетки могут образовываться наплывы массы на сетку, что приводит к ухудшению макроструктуры бумаги и снижению показателей прочности. При обратном соотношении увеличивается анизотропия бумажного листа. И в том и в другом случае затрудняется регулирование массы 1 м<sup>2</sup> бумаги по длине полотна и возможность управления степенью ориентации волокон.

В таблице 1 показано влияние соотношения скоростей массы и сетки на неравномерность просвета бумаги [1].

Таблица 1 – Влияние соотношения скоростей массы и сетки на неравномерность просвета бумаги

| Вид бумагоделательной машины                                         | Значение $K_M$ | Неравномерность просвета (отн. ед.) |
|----------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Плоскосеточная бумагоделательная машина средней производительности   | 0.96           | 70                                  |
|                                                                      | 0.98           | 65                                  |
|                                                                      | 1.00           | 63                                  |
|                                                                      | 1.02           | 66                                  |
|                                                                      | 1.04           | 72                                  |
| Бумагоделательная машина с двусторонним обезвоживанием (PaperFormer) | 0.96           | 61                                  |
|                                                                      | 0.98           | 59                                  |
|                                                                      | 1.00           | 56                                  |
|                                                                      | 1.02           | 58                                  |
|                                                                      | 1.04           | 64                                  |

Скорость поступления массы на сетку определяется по известной формуле Торичелли

$$v_M = 60\mu\sqrt{2gh}, \text{ м/мин} \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $h$  – напор массы перед выпускной щелью напорного ящика, м;  $\mu$  – коэффициент вытекания массы.

Значение  $\mu$  зависит от формы выпускного отверстия, наличия местных сопротивлений вытеканию потока, концентрации массы, степени ее разработки, реологических характеристик, величины потока массы. Значение  $\mu$  всегда меньше 1, для современных напускных устройств  $\mu = 0,95...0,99$ .

Изменение скорости бумагоделательной машины (БДМ) ведет к изменению технологического режима и влияет на все системы БДМ. Поэтому для минимизации неравномерности просвета будем изменять скорость истечения бумажной массы с помощью изменения напора напускного устройства.

Данные о неравномерности просвета будем косвенным образом вычислять по весу бумажного полотна, измеряемого сканирующим устройством. Очевидно, что чем меньше изменение веса относительно среднего значения, тем лучше неравномерность бумажного полотна и, следовательно, изменение дисперсии веса метра квадратного будет оценкой неравномерности просвета.

Для оценки математического ожидания и дисперсии удобно пользоваться рекуррентными формулами:

$$m_N^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{N-1}{N} m_{N-1}^* + \frac{1}{N} x_N, \quad (3)$$

где  $m_N^*$  – оценка математического ожидания при выборке  $x_i$  из  $N$  отсчетов,  $m_{N-1}^*$  – оценка математического ожидания при выборке  $x_i$  из  $(N-1)$  отсчета.

$$D_N^* = \frac{N-1}{N} D_{N-1}^* + \frac{N-1}{N^2} (x_N - m_{N-1}^*)^2, \quad (4)$$

где  $D_N^*$  – оценка дисперсии по выборке  $x_i$  из  $N$  отсчетов,  $D_{N-1}^*$  – оценка дисперсии по выборке  $x_i$  из  $(N-1)$  отсчета.

В ходе проведения эксперимента была получена экстремальная зависимость между напором напускного устройства и среднеквадратичным отклонением веса, представленным на рис. 1. Полученная зависимость подтверждает экстремальное соотношение между соотношением скоростей  $K_M$  и неравномерностью просвета, приведенное в [1].

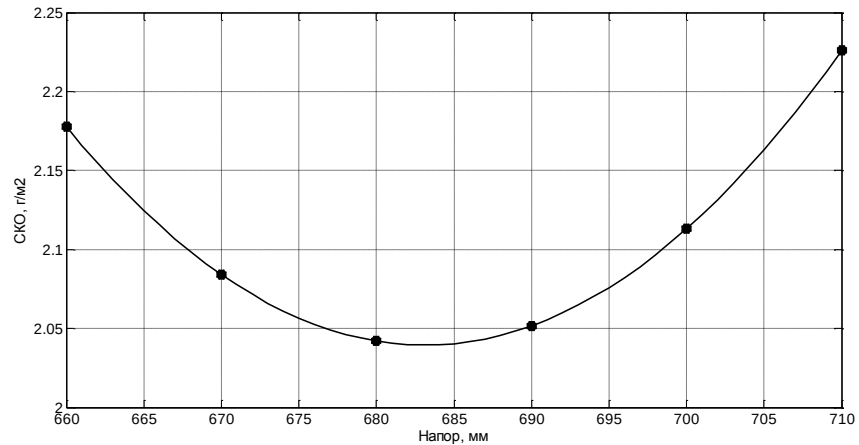


Рисунок 1 – Экстремальная зависимость

Для разработки алгоритма экстремального регулирования неравномерности просвета бумажного полотна была создана математическая модель объекта управления. Она состоит из последовательно соединенного экстремального звена (нелинейная часть) с неизвестной характеристикой

$$u = f(x) \quad (5)$$

и апериодическим звеном первого порядка (линейная часть) со звеном чистого запаздывания с известной величиной  $\tau$ .

$$W(s) = \frac{1}{Ts+1} e^{-\tau s}, \quad (6)$$

где  $T$  – постоянная времени, с;  $\tau$  – величина запаздывания, с.

Запаздывание будет рассчитываться по формуле

$$T = \frac{60L}{v}, \quad (7)$$

где  $L$  – длина бумажного полотна от напорного ящика до сканирующего устройства машины, м;  $v$  – средняя скорость машины, м/мин.

Опишем нелинейную и линейную части модели разностным уравнением  $n$ -го порядка с соответствующими начальными условиями и коэффициентами, зависящими от времени:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n a_i(k)y(k-i) + \sum_{j=0}^m b_j(k)u(k-j-d) + e(k), \quad (8)$$

где  $y(k)$  – выход модели (временного ряда) в  $k$ -й момент времени;  $\{a_i(k), i = 1, n\}$  – параметры авторегрессии;  $\{b_j(k), j = 0, m\}$  – параметры скользящего среднего;  $d$  – дискретное запаздывание.

Очевидно, что при переходе через экстремум коэффициент передачи объекта будет изменять свой знак. Следовательно, задача поиска экстремального значения регулируемого параметра сводится к задаче нахождения нуля коэффициента передачи.

Значение коэффициента передачи и его знак можно определить, используя рекуррентную процедуру метода наименьших квадратов (РМНК).

Алгоритм РМНК может быть представлен в следующем виде [2]

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + \gamma(k)e(k+1); \\ \gamma(k) = \mu(k+1)P(k)\Phi(k+1); \\ e(k+1) = y(k+1) - \Psi^T(k+1)\hat{\theta}(k), \end{cases} \quad (9)$$

где  $\hat{\theta}(k-1) = [a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m]$  – вектор параметров модели;

$\Psi^T(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-n), u(k-d-1), \dots, u(k-d-m)]$  – вектор данных;

$\mu(k+1) = \frac{1}{1 + \Psi^T(k+1)P(k)\Psi(k+1)}$  – вектор коррекции;  $P(k) = \frac{1}{[\Psi^T(k)\Psi(k)]}$

– весовая матрица;  $P(k+1) = [I - \gamma(k)\Psi^T(k+1)]P(k)$  – весовая матрица, рассчитанная на следующем шаге;  $\Phi(k+1) = \Psi(k+1)$ ;  $\hat{\theta}(0) = 0$ ;  $P(0) = \alpha I$  – начальные значения переменных.

Коэффициент передачи объекта  $k_o$  вычисляется на основании теоремы о конечном значении дискретной передаточной функции

$$k_o = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^m}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^n} = \frac{\sum_{j=0}^m b_j(k)}{1 + \sum_{i=1}^n a_i(k)}. \quad (10)$$

Поиск нуля  $k_o$  может осуществляться одним из известных методов: дихотомии, золотого сечения, Ньютона и т.д. [3].

Структурная схема системы управления представлена на рис. 2.

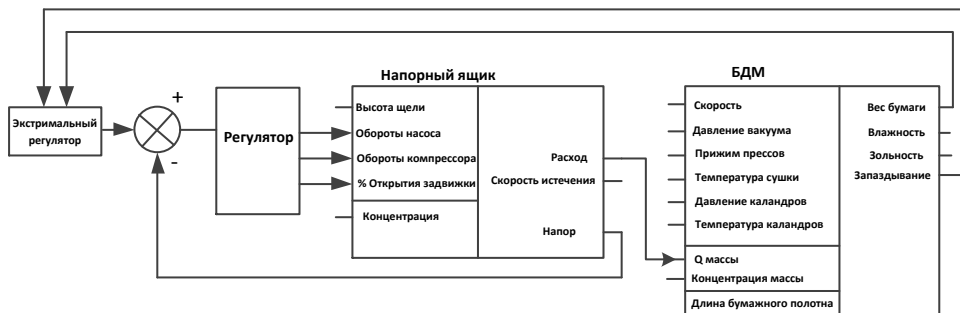


Рисунок 2 – Структурная схема системы управления

Проверка предложенного алгоритма была проведена на действующей бумагоделательной машине с напорным ящиком с воздушной подушкой.

Тренды испытания работы системы управления приведены на рис. 3.

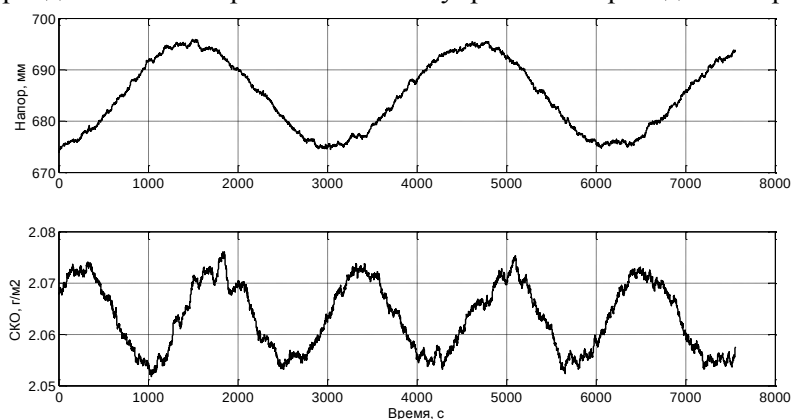


Рисунок 3 – Тренды испытания экстремальной системы управления

Работа экстремального регулятора представлена на рис. 4

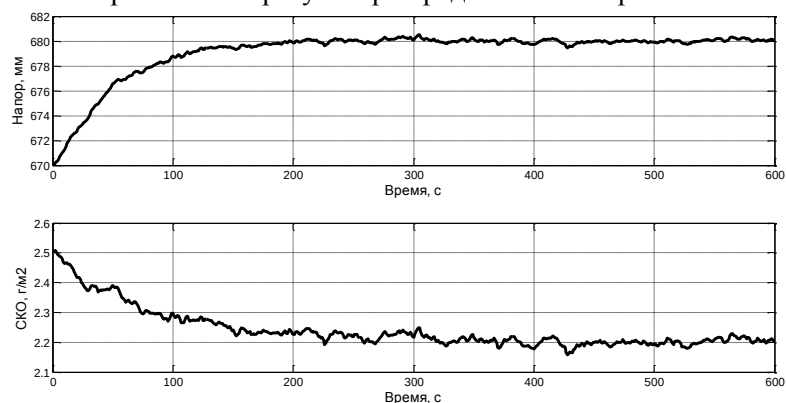


Рисунок 4 – Тренды работы экстремального регулятора

### Выводы

1. Экспериментально подтверждена экстремальная зависимость между соотношением скоростей бумажной массы и бумагоделательной машины и среднеквадратичным отклонением веса бумажного полотна, которое определяет степень неравномерности просвета бумаги.
2. Предлагается для улучшения неравномерности просвета использовать алгоритм экстремального регулирования.
3. Разработан алгоритм поиска экстремума характеристики инерционно-го объекта с запаздыванием по текущим измерениям его входа и выхода с использованием рекуррентной процедуры метода наименьших квадратов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология целлюлозно-бумажного производства : В 3 т. – Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона. – СПб. : Политехника, 2005. – 423 с. : ил.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егунова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 744 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М. : Мир, 1984. – 541 с.

УДК 621.9.2; 681.5

# К ВОПРОСУ ОБ ИНВАРИАНТНОСТИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ НА СТАНКАХ ТОКАРНОГО ТИПА

© Ю.М. Передрей, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

© А.Д. Нелюдов, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

## TO QUESTION ABOUT INVARIANCE OF THE PROCESS OF THE PROCESSING ON TOOL OF THE TURNING TYPE

© U.M. Peredrey, Penza State Technology University (Penza, Russia)

© A.D. Nelyudov, Penza State Technology University (Penza, Russia)

В статье показано, при каких условиях могут быть обеспечены условия инвариантности процесса обработки заготовок на токарных станках.

**Ключевые слова:** параметрическая инвариантность, обработка резанием, точность обработки, симплекс-метод.

In article is shown, under what condition can be provided condition to invariance of the process of the processing the stocking up on lathes.

**Key words:** parametric invariance, processing by cutting, accuracy of the processing, simplex-method.

**E-mail:** ump36@mail.ru

Влияние технологических факторов на погрешность обработки изучалось многими авторами [1–3]. Однако при этом не ставилась задача минимизации погрешности обработки применительно к обработке на станках, оснащенных системами активного контроля и регулирования размеров. Рассмотрим влияние некоторых факторов на точность обработки.

Деформации элементов технологической системы определяются величиной и направлением силы резания, которая зависит от физико-механических характеристик материала заготовки, глубины резания, подачи, сил трения на поверхностях резца, геометрии режущего инструмента и др.

Каждый из этих параметров является комплексным и определяется некоторым множеством. Так, геометрия режущего инструмента содержит множество  $\Gamma = \{\varphi, \varphi_1, \lambda, \gamma, \alpha, \beta, r, h_n\}$ , где  $\varphi, \varphi_1$  – главный и вспомогательный углы в плане;  $\lambda$  – угол наклона главной режущей кромки;  $\gamma$  – передний угол;  $\alpha$  – главный задний угол;  $r$  – радиус при вершине резца;  $h_n$  – износ резца по задней грани. Свойства обрабатываемого материала характеризуются временным сопротивлением на разрыв  $\sigma_B$ , твердостью по Бринеллю  $HB$ , показателем политропы сжатия  $m$ , то есть  $M = \{\sigma_B, HB, m\}$ . Условия обработки характеризуются величиной скорости резания  $v_p$ , подачей  $s$ , глубиной резания  $t$ , величиной усадки стружки  $\xi$ , свойствами смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), состоянием режущего инструмента и И, то есть  $Y = \{v_p, s, t, \xi, \text{СОЖ}, И\}$ . Кроме перечисленных, на ход технологического процесса влияют и другие факторы. Обозначим множество всех факторов, влияющих на ход технологического процесса, через  $T$ . Тогда множества  $\Gamma, M, Y$  будут являться подмножествами  $T$ , то есть  $T = \{\Gamma, M, Y\}$ .

Таким образом, погрешность обработки является функцией некоторого множества  $\Delta D = f(T)$ . Это выражение в явном виде решено только для частных случаев. Поэтому оно не может быть использовано для достижения поставленной цели  $\Delta D = \min$ .

На рис. 1 показано влияние вертикальной составляющей силы резания для случая, когда вершина резца смещена вверх от оси центров станка на величину  $h_b = AB$ . После приложения силы  $P_z$  вершина резца сместится вниз. При этом фактический радиус обработанной поверхности изменится на величину  $\Delta r = \vec{r}_1 - \vec{r} = A_1O - AO$ . Подставляя в это уравнение значения радиус-векторов из треугольников  $\triangle AOB$  и  $\triangle A_1OB$ , получим

$$\Delta r = \overline{BA_1} - \overline{BA} = h_1 - h = -\Delta h.$$

Таким образом, отжим резца силой  $P_z$  приводит к уменьшению диаметра обработанной поверхности.

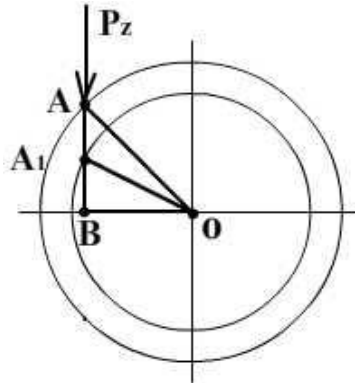


Рисунок 1 – Влияние на точность обработки составляющей силы резания  $P_z$

Если вершина резца при настройке будет смещена вниз от оси центров станка, то это приведет к увеличению диаметра обработанной поверхности.

Действие радиальной составляющей силы резания  $P_y$  приводит к отжиму резца, заготовки, что приводит к увеличению диаметра обработанной поверхности.

Осевая составляющая силы резания  $P_x$  вызывает отжим резца в горизонтальной плоскости и поворот резцедержателя (рис. 2). Отжим приводит к увеличению радиус-вектора  $\vec{r}$ , а поворот, в зависимости от положения мгновенного полюса вращения, либо к увеличению, либо к уменьшению радиус-вектора  $\vec{r}$ .

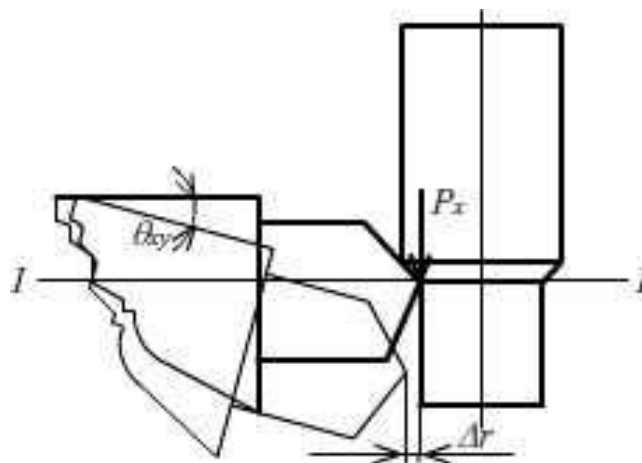


Рисунок 2 – Влияние на точность обработки составляющей силы резания  $P_x$



Суммарная погрешность обработки, вызываемая деформациями элементов технологической системы, зависит от положения резца относительно обрабатываемой поверхности, размеров и пространственного положения звеньев системы, а также от величин, составляющих силы резания.

Таким образом, можно утверждать, что существуют такие условия обработки, при которых одни возмущения вызывают положительные отклонения получаемого при обработке размера, а другие отрицательные. Пусть  $x \in T$ , положительная погрешность равна  $\Delta D^+$ , отрицательная  $\Delta D^-$ ,  $y \in Y$ .

Тогда

$$\exists y (\forall x (\Delta D^+ \neq 0 \rightarrow \Delta D^- \neq 0)).$$

Следовательно, существует принципиальная возможность найти условия, при которых  $\Delta D^+ = \Delta D^-$  или  $|\Delta D^+ - \Delta D^-| < \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – сколь угодно малое положительное число. Тогда можно утверждать, что

$$\exists y (y \in Y) (\forall x (x \in T) (\Delta D^+ < 0 \wedge \Delta D^- < 0 \rightarrow |\Delta D^+ - \Delta D^-| < \varepsilon)). \quad (1)$$

На эту возможность было указано в работе [4]. Однако в ней не дается четкой инженерной методики поиска условий инвариантности (1).

Рассмотрим задачу обеспечения точности обработки в общем виде и выясним условия, при которых возможно снижение погрешностей обработки при действии на систему сил резания и возмущений, вызванных отклонениями входных данных заготовки.

Обозначим через  $\delta_{ijk}$  – величину перемещения;  $i$  – номер координатной оси (1 – ось X, 2 – ось Y, 3 – ось Z);  $j$  – номер звена технологической системы;  $k$  – номер возмущающего фактора;  $\theta_{ijk}$  – поворот вокруг  $i$ -й оси  $j$ -го звена под действием  $k$ -го фактора. Составим матрицу размера  $6 \times n$  перемещений звеньев системы

$$\begin{pmatrix} \delta_{ijk} \\ \theta_{ijk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_{11k} & \delta_{12k} & \dots & \delta_{1nk} \\ \delta_{21k} & \delta_{22k} & \dots & \delta_{2nk} \\ \delta_{31k} & \delta_{32k} & \dots & \delta_{3nk} \\ \theta_{11k} & \theta_{12k} & \dots & \theta_{1nk} \\ \theta_{21k} & \theta_{22k} & \dots & \theta_{2nk} \\ \theta_{31k} & \theta_{32k} & \dots & \theta_{3nk} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Просуммировав матрицы перемещений по всем возмущениям, получим матрицу перемещений звеньев технологической системы

$$\Delta = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{k=n} \delta_{ijk} \\ \sum_{k=1}^{k=n} \theta_{ijk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_{ij} \\ \theta_{ij} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Перемещения звеньев копируются на обрабатываемой поверхности с некоторыми передаточными коэффициентами  $K_{ij}^{\delta\theta}$ . Оставим матрицу передаточных коэффициентов

$$K = \begin{pmatrix} K_{11}^{\delta} & K_{21}^{\delta} & K_{31}^{\delta} & K_{11}^{\theta} & K_{21}^{\theta} & K_{31}^{\theta} \\ K_{12}^{\delta} & K_{22}^{\delta} & K_{32}^{\delta} & K_{12}^{\theta} & K_{22}^{\theta} & K_{32}^{\theta} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{1n}^{\delta} & K_{2n}^{\delta} & K_{3n}^{\delta} & K_{1n}^{\theta} & K_{2n}^{\theta} & K_{3n}^{\theta} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Умножая матрицу (3) на матрицу (4) слева, получим матрицу отклонений размера обрабатываемой поверхности от заданного

$$A = K\Delta \quad (5)$$

Элементами этой матрицы являются погрешности радиуса-вектора обрабатываемой поверхности

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{in} & A_{in} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix},$$

где элементы  $A_{ij}$  матрицы вычисляются по формуле

$$A_{ij} = K_{1i}^{\delta} \delta_{1j} + K_{2i}^{\delta} \delta_{2j} + K_{3i}^{\delta} \delta_{3j} + K_{1i}^{\theta} \theta_{1j} + K_{2i}^{\theta} \theta_{2j} + K_{3i}^{\theta} \theta_{3j}. \quad (6)$$

Если перемещения звеньев системы взаимно независимы, то при  $i \neq j$ , соответствующие элементы матрицы (5) будут равны нулю. Следовательно, матрица (5) является диагональной.

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{nn} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Так как одни возмущения в системе вызывают положительные отклонения обрабатываемой поверхности, а другие отрицательные, то, следовательно, матрицу (7) можно представить как разность двух матриц  $A_{ii} = A_{ii}^{+} - A_{ii}^{-}$ . Это уравнение показывает, что для уменьшения погрешности обработки необходимо, чтобы деформации звеньев системы вызывали погрешности с разными знаками. Это условие дает возможность подобрать такие значения параметров системы, при которых погрешность обработки не будет зависеть от переменных факторов. То есть в данном случае удовлетворяются условия, необходимые для достижения абсолютной инвариантности – принцип двухканальности [5].

Таким образом, инвариантность размера обработанной поверхности от возмущений в системе может быть обеспечена при условии равенства нулю следа матрицы (7).

$$tr A = 0 \quad (8)$$

В случае токарной обработки передача возмущения идет по двум компенсирующим друг друга каналам. Следовательно, можно реализовать принцип двухканальности и достичь инвариантности размера детали. Вредное влияние возмущений на точность обработки в этом случае устраняется предварительным выбором значений параметров технологического процесса, удовлетворяющих условиям инвариантности.

Однако получить значения этих параметров на основе теоретических расчетов чрезвычайно трудно, а во многих случаях даже невозможно.

Задача может быть решена экспериментальным методом. При решении этой задачи рационально использовать процедуру оптимизации, то есть нахождения области оптимума. Наиболее экономичен и наилучшим образом формализованным является метод симплекс-планирования.

Использование симплекс-процедуры для оптимизации технологических процессов обработки на металлорежущем оборудовании имеет свои особенности. Эти особенности вызваны тем, что каждый станок имеет определенные дискретные значения подач и частот вращения шпинделя. Может оказаться, что рассчитанные для правильного симплекса натуральные значения факторов не могут быть реализованы. Это приводит к необходимости использования нерегулярных симплексов. В этом случае координаты вершин регулярного симплекса, определенные с учетом паспортных данных станка, умножаются на коэффициент коррекции  $\gamma$ :

$$\tilde{x}'_i = \gamma \tilde{x}_i, \quad (9)$$

где  $\tilde{x}'_i$  – скорректированное значение фактора;  $\tilde{x}_i$  – значение фактора для регулярного симплекса.

Для практического использования этой методики необходимо:

- вычислить координаты вершин регулярного симплекса;
- определить натуральные значения факторов в вершинах регулярного симплекса;
- выбрать ближайшее значение фактора по паспорту станка;
- определить коэффициент коррекции по формуле (9);
- вычислить скорректированное кодированное значение фактора.

Таким образом, получаем матрицу нерегулярного симплекса.

Движение к оптимуму совершаем в обычном для симплекс-планирования порядке [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корсаков В.С. Точность механической обработки. – М. : Машигиз, 1961. – 88 с.
2. Соколовский А.П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. – М.-Л. : Машигиз, 1952.
3. Адаптивное управление точностью обработки. – М. : НИИМАШ, 1975.
4. Лоладзе Т.Н., Шанишавили Г.Д. Принципы инвариантности размера детали от силы резания на примере токарной обработки // Теория машин-автоматов и пневмогидроприводов. – М. : Машиностроение. – 1970. – С. 81–89.
5. Петров Б.Н. О применении условий инвариантности // Тр. II Всесоюзного совещания по теории автоматического регулирования. Том II. – М. : Наука, 1950.
6. Передерей Ю.М. Математические методы в технологии машиностроения. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2007. – 204 с.

УДК 681.5

# РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ УСИЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

© Н.А. Симанин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© И.А. Поляков, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

## CALCULATING THE AMPLIFICATION COEFFICIENTS OF THE HYDRAULIC MEASURING CONVERTER

© N.A. Simanin, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© I.A. Polyakov, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В статье приведены методики расчета коэффициентов усиления по давлению и расходу оригинального гидравлического измерительного преобразователя вращающего момента типа сопло – заслонка, разработанного для систем автоматического регулирования приводов промышленного оборудования.

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, вращающий момент, сопло – заслонка, коэффициент усиления, давление, расход.

In the article the authors give the amplification coefficients design procedures on pressure and expense of the original hydraulic measuring torque converter of a flapper – nozzle type developed for industrial equipment drives automatic control systems.

**Key words:** measuring converter, torque, flapper – nozzle, amplification coefficient, pressure, the expense.

**E-mail:** nsimanin@mail.ru; dionisiw@mail.ru

Разработка и совершенствование систем автоматического управления гидравлическими приводами промышленного оборудования требует создания измерительных преобразователей, использующих единую с приводом рабочую среду (жидкость) и обладающих заданными статическими и динамическими характеристиками.

Анализ известных технических решений показал, что наиболее приемлемыми могут стать преобразователи, созданные на базе известных гидравлических усилителей, в частности типа сопло – заслонка [1, с. 6].

В измерительных преобразователях переменный дроссель сопло – заслонка обычно используют совместно с последовательно включенным постоянным дросселем типа шайба или втулка (рис. 1,а).

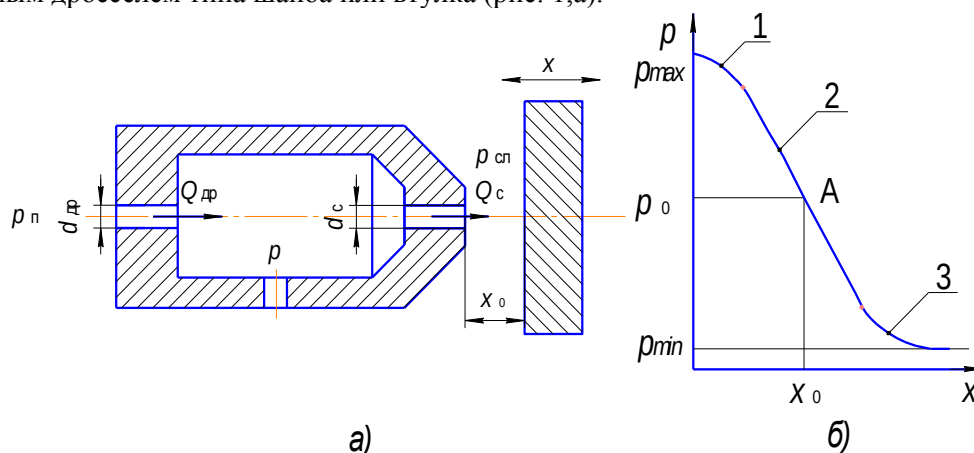


Рисунок 1 – Полумостовая схема (а) измерительного преобразователя сопло – заслонка и статическая характеристика междроссельной камеры (б)

Такое соединение сопротивлений образует междроссельную камеру, давление  $p$  жидкости в которой изменяется при перемещении  $x$  заслонки, пропорциональном изменению контролируемого параметра. Зависимость  $p = f(x)$  является регулировочной (статической) характеристикой по давлению междроссельной камеры и определяет выходной сигнал преобразователя, выполненного по полумостовой схеме (рис. 1,б).

Анализируя приведенную характеристику преобразователя, на ней можно выделить три характерных участка [2, с. 54].

Первый участок соответствует малым зазорам  $x_0 - x$  между заслонкой и торцом сопла. Очевидно, что при  $x = x_0$  заслонка полностью закроет сопло, и давление жидкости в междроссельной камере преобразователя станет максимальным, равным давлению питания  $p = p_{\max} = p_{\pi}$ . Регулировочная характеристика преобразователя на участке нелинейная.

Второй участок характеристики является основным рабочим. На нем находится рабочая точка А, которая соответствует начальному положению  $x_0$  заслонки при  $x = 0$ , а давление в междроссельной камере определяется зависимостью

$$p_0 = p_{\min} + \frac{p_{\max} - p_{\min}}{2}. \quad (1)$$

Регулировочная характеристика измерительного преобразователя на рабочем участке практически линейная, а крутизна характеристики в рабочей точке определяет коэффициент усиления преобразователя. Для полумостовой схемы (рис. 1) коэффициент усиления по давлению

$$\left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)_{x=0} = k_p = p_{\pi} / 2x_0. \quad (2)$$

Третий участок нерабочий, характеризуется большими зазорами  $x_0 + x$  между соплом и заслонкой, а также минимальным давлением жидкости в междроссельной камере  $p = p_{\min} \approx p_{\text{сл}}$ . Такой выходной сигнал преобразователя нельзя использовать для приведения в действие автоматического регулятора системы управления. Статическая характеристика преобразователя на данном участке нелинейная.

Для увеличения мощности выходного сигнала в два раза применяют мостовые схемы преобразователей, состоящие из двух пар сопротивлений, то есть из двух полумостовых схем (рис. 2).

Разность давлений  $p_{\text{ип}} = p_1 - p_2 = f(x)$  в междроссельных камерах (выходной сигнал измерительного преобразователя) используется для приведения в действие исполнительного механизма ИМ автоматического регулятора системы управления, включенного в диагональ моста.

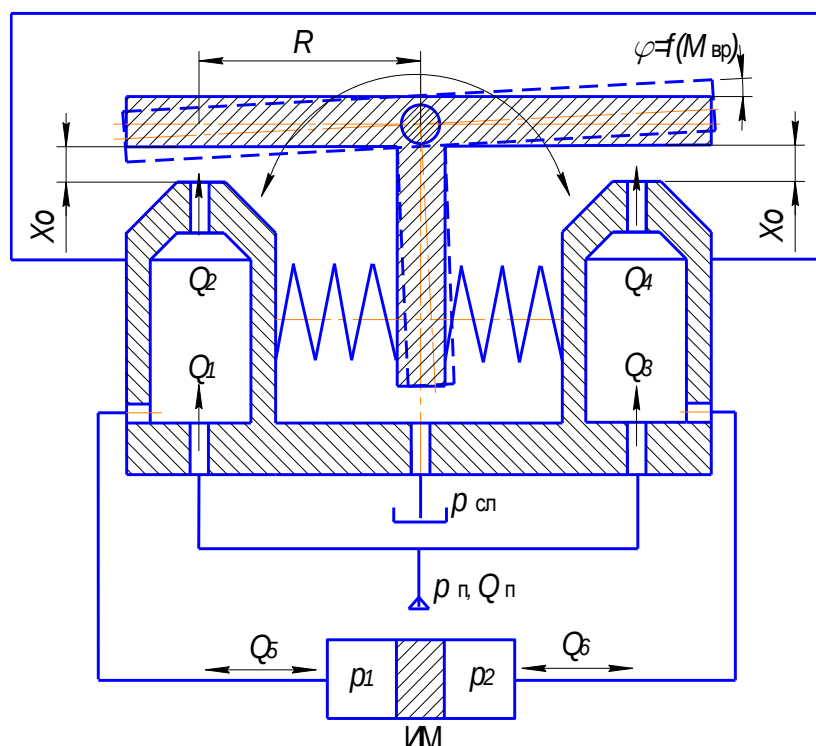


Рисунок 2 – Мостовая схема измерительного преобразователя с поворотной заслонкой

В Пензенской государственной технологической академии разработаны различные гидравлические измерительные преобразователи вращающего момента, которые могут быть использованы при создании систем автоматического регулирования приводов промышленного оборудования [1, с. 35, 37, 39; 3].

Для оценки измерительного преобразователя на стадии проектирования и теоретических исследований необходима методика расчета его коэффициентов усиления по давлению и расходу.

С целью упрощения расчетов сделаны следующие общепринятые допущения: у рабочей жидкости отсутствуют вязкость, сжимаемость и температурное расширение; внутренних утечек жидкости в преобразователе и исполнительном механизме нет; давление питания задано и постоянно, а давление слива равно нулю; потери давления в соединительных линиях и на нерегулируемых участках сопл отсутствуют; течение жидкости в сопротивлениях турбулентное, то есть коэффициенты расхода постоянные.

При малых углах поворота заслонки с незначительной погрешностью можно считать ее перемещение по дуге равным линейному перемещению на величину  $x = R \sin \varphi$ , где  $R$  – конструктивный параметр (рис. 2).

Тогда регулировочная характеристика по давлению  $p_{\text{ип}}(\varphi)$  измерительного преобразователя при повороте заслонки против часовой стрелки будет определяться выражением

$$p_{\text{ип}} = p_1 - p_2 = \left[ \frac{a_1^2}{a_1^2 + b_2^2 (x_0 - x)^2} - \frac{a_3^2}{a_3^2 + b_4^2 (x_0 + x)^2} \right] p_{\text{п}}, \quad (3)$$

$$a_1 = a_3 = \mu_{др} \frac{\pi d_{др}^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad (4)$$

$$b_2 = b_4 = \mu_c \pi d_c \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad (5)$$

где  $a$  – гидравлическая проводимость постоянного дросселя шайба;  $b$  – относительная гидравлическая проводимость переменного дросселя сопло – заслонка.

Если пренебречь зависимостью коэффициентов расхода  $\mu_1$  и  $\mu_3$  от режима течения жидкости, то для идентичных постоянных дросселей можно считать

$$p_1 = p_n \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{x}{x_0}\right)^2}, \quad (6)$$

$$p_2 = p_n \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{x}{x_0}\right)^2}, \quad (7)$$

тогда статическая характеристика преобразователя примет вид

$$p_{ин} = p_1 - p_2 = p_n \left[ \frac{1}{1 + \left(1 - \frac{x}{x_0}\right)^2} - \frac{1}{1 + \left(1 + \frac{x}{x_0}\right)^2} \right]. \quad (8)$$

Линеаризацию уравнения (8) выполним разложением его правой части в ряд Маклорена для функции  $x/x_0$  вокруг нулевых значений

$$p_{ин} = k_p x = k_p R \sin \varphi, \quad (9)$$

где  $k_p = p_n / x_0$  – коэффициент усиления измерительного преобразователя по давлению для мостовой схемы.

Анализ выражения (9) показывает, что коэффициент усиления преобразователя возрастает с увеличением давления питания на входе преобразователя.

Для проектируемого измерительного преобразователя желательно, чтобы коэффициент усиления по давлению сохранял максимальное значение при возможно большем диапазоне изменения угла поворота заслонки. Для линейного или почти линейного участка статической характеристики данное условие выполняется автоматически.

Если предположить, что после поворота заслонки исполнительный механизм ИМ примет новое положение равновесия и установится равенство давлений  $p_1 = p_2 = p_n / 2$ , то расходы жидкости через сопротивления измерительного преобразователя и в каналах управления исполнительным механизмом будут связаны следующими соотношениями:

$$Q_5 = Q_1 - Q_2, \quad (10)$$

$$Q_6 = Q_4 - Q_3, \quad (11)$$

$$Q_1 = Q_3. \quad (12)$$

При этом расход жидкости в диагонали моста, определяющий скорость движения исполнительного механизма ИМ из нейтрального положения,

$$Q_{ин} = Q_5 + Q_6 = \frac{1}{2}(Q_4 - Q_2). \quad (13)$$

Тогда с учетом уравнения (3)

$$Q_{\text{ИП}} = \mu_c \pi d_c \sqrt{\frac{p_n}{\rho}} \cdot x \quad (14)$$

или

$$Q_{\text{ИП}} = k_Q x = k_Q R \sin \varphi, \quad (15)$$

где  $k_Q = \mu_c \pi d_c \sqrt{\frac{p_n}{\rho}}$  – коэффициент усиления измерительного преобразователя по расходу.

Линейное уравнение (15) представляет собой регулировочную статическую характеристику по расходу  $Q_{\text{ИП}}(\varphi)$  измерительного преобразователя, которая показывает, что коэффициент усиления по расходу определяет быстродействие преобразователя и возрастает с увеличением диаметров отверстий сопел и давления питания, а следовательно, расхода жидкости через сопла.

Обобщенная статическая характеристика  $Q_{\text{ИП}}(p_{\text{ИП}}, \varphi)$  измерительного преобразователя может быть получена решением системы уравнений (8), (10) и (11)

$$Q_{\text{ИП}} = b x_0 \sqrt{\frac{p_n}{\rho}} \left[ \sqrt{1 - \frac{p_{\text{ИП}}}{p_n}} - \left( 1 - \frac{R \sin \varphi}{x_0} \right) \sqrt{1 + \frac{p_{\text{ИП}}}{p_n}} \right]. \quad (16)$$

После линеаризации уравнения (16), выполненной разложением правой части в ряд Маклорена вокруг нулевых значений, и ограничении вторым членом разложения, получим

$$Q_{\text{ИП}} = Q_c \left( \frac{R \sin \varphi}{x_0} - \frac{p_{\text{ИП}}}{p_n} \right), \quad (17)$$

где  $Q_c = \mu \pi d_c x_0 \sqrt{\frac{p_n}{\rho}}$  – расход жидкости через одно сопло преобразователя при  $\varphi = 0$ .

Уравнение (17) можно представить в виде

$$Q_{\text{ИП}} = k_Q x - k_{Qp} p_{\text{ИП}}, \quad (18)$$

где  $k_Q = Q_c / x_0$  – коэффициент усиления по расходу;

$k_{Qp} = Q_c / p_n$  – расходно-перепадный коэффициент усиления.

Приведенные методики расчета коэффициентов усиления по давлению и расходу могут быть использованы для оценки параметров и теоретических исследований измерительного преобразователя вращающего момента типа сопло – заслонка на стадии проектирования.

Основным направлением повышения характеристик преобразователей подобного типа следует считать повышение давления питания рабочей среды (жидкости).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симанин Н.А., Голубовский В.В. Гидравлические системы автоматического управления технологическими операциями в машиностроении. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2009. – 155 с.
2. Электрогидравлические следящие системы / Под ред. В.А. Хохлова. – М. : Машиностроение, 1971. – 432 с.
3. Патент № 116636 РФ на полезную модель. Измерительный преобразователь вращающего момента / Н.А. Симанин, В.В. Голубовский, С.Н. Симанин, А.Н. Расстегаев. – Оpubл. 27.05.2012; Бюл. № 15.



УДК 621.9.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ

© Ю.М. Передрей, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

© А.Д. Нелюдов, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

## STUDY OF THE MOVING THE STOCKING UP WHEN PROCESSING

© U.M. Peredrey, Penza State Technology University (Penza, Russia)

© A.D. Nelyudov, Penza State Technology University (Penza, Russia)

В статье дается вывод уравнения движения заготовки при обработке на станках токарного типа.

**Ключевые слова:** технологическая система, заготовка, обработка, токарный станок, уравнение движения.

In article is given conclusion of the equation of the moving the stocking up when processing on tool of the turning type.

**Key words:** technological system, stocking up, processing, lathe, equation of the motion.

**E-mail:** ump36@mail.ru

Точность обработки на токарных станках может быть повышена при использовании систем автоматического регулирования технологического процесса обработки. Для построения таких систем необходимо знать уравнение движения заготовки как звена управления. В данной статье дается вывод уравнения движения заготовки в процессе ее обработки на станке.

Размеры обрабатываемой поверхности формируются режущими кромками резца. Это обстоятельство упрощает процесс анализа движения объекта управления (заготовки), поскольку позволяет рассматривать движение заготовки не как пространственного тела, а только одной её точки – центра поперечного сечения, в котором происходит процесс резания. В этом же сечении приложена внешняя возмущающая сила.

Расчетная схема технологической системы токарного станка показана на рис. 1.

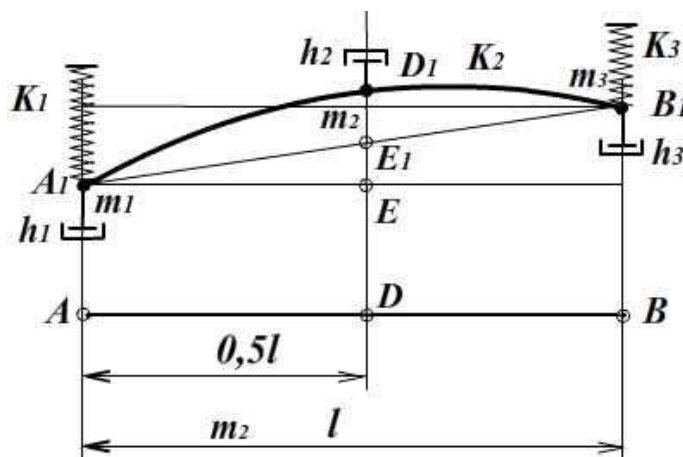


Рисунок 1 – Расчетная схема технологической системы токарного станка:

$A, B$  – положение концов заготовки до приложения силы резания;

$A_1, B_1, D_1$  – положение концов и оси заготовки после приложения силы резания;

$K_1, K_2, K_3$  – жесткость передней бабки, заготовки и задней бабки, соответственно

Замена реальной конструкции такой расчетной схемой правомерна при следующих допущениях:

- амплитуды вращательных колебаний реальных масс вокруг своих центров малы и ими можно пренебречь. Массы сосредоточены в центрах масс;
- перемещения по различным направлениям взаимно независимы. Так как на точность обработки наибольшее влияние оказывает движение в плоскости ХОУ по оси Y, то будем рассматривать движение заготовки только в этой плоскости;
- возмущающая сила изменяет направление в пространстве незначительно;
- перемещения в системе малы, поэтому колебания можно рассматривать как малые колебания;
- масса заготовки приложена в точке резания;
- резец в процессе обработки не отрывается от обрабатываемой поверхности, следовательно, сила резания имеет непрерывный во времени характер.

В зоне действия силы резания схему можно разбить на две, приложив к каждой из них возмущающую силу и рассматривать отдельно перемещения в системах заготовки и резцедержателя. Сила резания имеет непрерывный плавный характер только при выключенной системе подналадки. Включение в работу привода подналадки вызывает появление пульсирующей составляющей силы резания, которую можно представить как прямоугольные импульсы амплитуды  $\pm P_n$  длительностью  $\tau$ , следующие с периодом  $T$ .

При составлении уравнений движения будем рассматривать заготовку как балку на упругих опорах. Уравнения Лагранжа 2-го рода

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_i} \right) + \frac{\partial U}{\partial y_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{y}_i} = P_i,$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы;  $U$  – потенциальная энергия системы;  $D$  – диссипативная функция;  $P_i$  – обобщенные силы;  $y_i$  – обобщенные координаты.

В качестве обобщенных координат примем перемещения концов заготовки  $y_1$  и  $y_3$  и точки приложения силы резания  $y_2$ .

Согласно рис. 1,

$$y_1 = AA_1; y_2 = DD_1; y_3 = BB_1; y = E_1D_1;$$

$$y = y_2 - y_3 + \frac{1}{2}(y_3 - y_1).$$

Потенциальная энергия системы

$$U = \frac{1}{2} \left( \left( K_1 + \frac{K_2}{4} \right) y_1^2 + K_2 y_2^2 + \left( K_3 + \frac{K_2}{4} \right) y_3^2 - K_3 y_1 y_2 + \frac{K_2}{2} y_1 y_3 - K_2 y_2 y_3 \right).$$

Частные производные от  $U$ :

$$\frac{\partial U}{\partial y_1} = \frac{1}{2} \left( 2 \left( K_1 + \frac{K_2}{4} \right) y_1 - K_3 y_2 + \frac{K_2}{2} y_3 \right),$$

$$\frac{\partial U}{\partial y_2} = \frac{1}{2} (2K_2 y_2 - K_3 y_1 - K_2 y_3),$$

$$\frac{\partial U}{\partial y_3} = \frac{1}{2} \left( 2 \left( K_3 + \frac{K_2}{4} \right) y_3 - K_2 y_2 + \frac{K_2}{2} y_1 \right).$$

Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{1}{2} (m_1 \dot{y}_1^2 + m_2 \dot{y}_2^2 + m_3 \dot{y}_3^2) = \frac{1}{2} \sum m_i \dot{y}_i^2.$$

Частные производные

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_i} = m_i \dot{y}_i.$$

Тогда

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_i} \right) = m_i \ddot{y}_i.$$

Диссипативная функция

$$D = \frac{1}{2} (h_1 \dot{y}_1^2 + h_2 \dot{y}_2^2 + h_3 \dot{y}_3^2) = \frac{1}{2} \sum h_i \dot{y}_i^2.$$

Частные производные

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{y}_i} = h_i \dot{y}_i.$$

Обобщенные силы

$$P_1 = -\frac{1}{2} P_y; \quad P_2 = P_y; \quad P_3 = -\frac{1}{2} P_y.$$

Подставляя частные производные в уравнение Лагранжа, получаем систему дифференциальных уравнений, описывающих движение заготовки,

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + \frac{1}{2} \left( 2 \left( K_1 + \frac{K_2}{4} \right) y_1 - K_3 y_2 + \frac{K_2}{2} y_3 \right) + h_1 \dot{y}_1 &= -\frac{1}{2} P_y \\ m_2 \ddot{y}_2 + \frac{1}{2} (2K_2 y_2 - K_3 y_1 - K_2 y_3) + h_2 \dot{y}_2 &= P_y \\ m_3 \ddot{y}_3 + \frac{1}{2} \left( 2 \left( K_3 + \frac{K_2}{4} \right) y_3 - K_2 y_2 + \frac{K_2}{2} y_1 \right) + h_3 \dot{y}_3 &= -\frac{1}{2} P_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В этой системе уравнений коэффициенты  $K_1$  и  $K_3$  являются постоянными величинами для принятого типа станка. Коэффициенты диссипативной функции  $h_1$  и  $h_3$  зависят от состояния узлов крепления передней и задней бабок станка. За время обработки детали они не изменяются и поэтому их можно принять постоянными.

Жесткость детали  $K_2$  зависит от геометрических параметров обрабатываемой заготовки, положения точки резания, а также от метода закрепления заготовки на станке [1]. В общем случае жесткость  $K_2$  можно определить, используя уравнение изогнутой оси балки в дифференциальной форме

$$K_2 = \frac{48EI}{l^3},$$

где  $E$  – модуль упругости материала заготовки;  $I$  – момент инерции поперечного сечения заготовки.

Жесткость узлов станка (передней и задней бабок) на один-два порядка выше жесткости заготовки. Следовательно, в системе уравнений (1) движением концов заготовки можно пренебречь, положив  $y_1 = 0$ ;  $y_3 = 0$ .

Тогда получим

$$m_2 \ddot{y}_2 + h_2 \dot{y}_2 + K_2 y_2 = P_y.$$

Обозначив  $2n = \frac{h_2}{m_2}$ ,  $d^2 = \frac{K_2}{m_2}$ , получим

$$\ddot{y}_2 + 2n \dot{y}_2 + d^2 y_2 = \frac{1}{m_2} P_y.$$

Это уравнение вынужденных колебаний при учете сил вязкого трения [2].

Передаточная функция заготовки как объекта управления

$$W_z(p) = \frac{1}{p^2 + 2np + d^2}.$$

Это уравнение показывает, что обрабатываемая заготовка движется как устойчивое колебательное звено (поскольку  $n > 0$  и  $d > 0$ ).

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Соколовский А.П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. – М.-Л. : Машигиз, 1952.
2. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. – М. : Энергоиздат, 1981.

---

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ

---

УДК 621.777.01

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СБОРОЧНОГО ПРОЦЕССА

© **В.В. Голубовский**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

© **С.Г. Прохоров**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

## DEFINITION OF TECHNOLOGICAL MODES OF THE ASSEMBLY PROCESS

© **V.V. Golubovsky**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **S.G. Prokhorov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Статья посвящена определению технологических режимов при сборке соединений с натягом. Рассмотрено влияние скоростных критериев, определяющих равномерность процесса сборки.

**Ключевые слова:** сборка соединений с натягом, скорость запрессовки, технологические режимы.

The article is devoted to the definition of technological modes when assembling tensed connections. Considers the impact of the speed of the criteria determining the regularity of the build process.

**Key words:** assembly of connections with tightness speed of pressing, technological modes.

**E-mail:** v.golubovsky@mail.ru; prosergen@mail.ru.

При сборке соединений с натягом сила запрессовки в основном определяется силой статического трения в зонах контакта сопрягаемых деталей.

Процесс сборки соединений с натягом (СН) характеризуется небольшими скоростями относительного перемещения деталей. При значительных силовых нагрузках и упругих характеристиках сборка с натягом в большинстве случаев характеризуется неравномерным (часто скачкообразным) относительным движением сопрягаемых деталей. Физическая сущность данного явления заключается в том, что для движения вала относительно втулки необходимо подвести некоторую энергию, превосходящую по величине потенциальную энергию сцепления контактирующих поверхностей [1]. Если подводимая энергия (в гидравлических прессах это потенциальная энергия давления жидкости) имеет один порядок с энергией сцепления, то наблюдается скачкообразный закон движения при запрессовке, что приводит к нежелательным последствиям, и в таких случаях чаще всего наблюдается схватывание.

В начальный момент времени усилие запрессовки будет возрастать до тех пор, пока оно не станет равным силе трения покоя, связанной со статическим коэффициентом трения. Дальнейшее возрастание усилия запрессовки приводит к начальному сдвигу и ускоренному движению штока гидроцилиндра в связи с уменьшением силы трения. Последнее обусловлено большим значением коэффициента трения покоя по сравнению со значением коэффициента трения скольжения.

Для получения плавного сборочного процесса необходимо проводить запрессовку с постоянной скоростью движения вала относительно втулки. Для этого

необходимо изменение параметров упругой системы или энергетических соотношений в системе. Управлять процессом запрессовки можно путем изменения энергетических соотношений в системе, например управлять мощностью пресса.

Для исключения пульсирующего (скачкообразного) характера движения рабочих органов пресса необходимо выполнение условия [2]:

$$U_{\pi} \leq U_{КП} + U_{КИ}, \quad (1)$$

где  $U_{\pi}$  – потенциальная энергия сцепления сопрягаемых поверхностей, определяемая величиной натяга и физико-механическим состоянием сопрягаемых поверхностей деталей;  $U_{КП}$  – кинетическая энергия движущихся частей пресса;  $U_{КИ}$  – дополнительная энергия, вводимая в систему пресс – вал – втулка.

При сборке ССН потенциальная энергия сцепления определяется по работе, необходимой для перемещения вала относительно втулки на величину предварительного смещения:

$$U_n = 0,5 T \Delta h, \quad (2)$$

где  $T$  – сила трения покоя;  $\Delta h$  – предварительное смещение вала относительно втулки.

Кинетическая энергия системы может быть определена как

$$U_{КП} + U_{КИ} = \frac{P}{2g} (V_T^2 + \Delta V^2), \quad (3)$$

где  $V_T$  – скорость перемещения пуансона пресса;  $P$  – максимальное усилие, передаваемое прессом;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\Delta V$  – приращение скорости относительного перемещения деталей соединения за счет дополнительного источника энергии.

Силу трения покоя (силу запрессовки) можно определить по формуле [2]

$$T = S_H \tau_0 [1 - \Phi(t)], \quad (4)$$

или по формуле [3]

$$R = \pi D L p_H f, \quad (5)$$

где  $S_H$  – номинальная площадь контакта в соединении;  $D$  и  $L$  – соответственно, диаметр и длина зоны контакта;  $\tau_0$  – удельная сила трения покоя  $\tau_0 = \sigma_T / \sqrt{3}$ ;  $\sigma_T$  – предел текучести наиболее мягкого материала соединения;  $\Phi(t)$  – интеграл вероятностей;  $f$  – коэффициент трения покоя;  $p_H$  – номинальное контактное давление, определяемое по известным уравнениям Ламе [3]:

$$p_H = \frac{\Delta}{\frac{D}{E_1} \left( \frac{1+k_1^2}{1-k_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{D}{E_2} \left( \frac{1+k_2^2}{1-k_2^2} + \mu_2 \right)}, \quad (6)$$

где  $k_1 = D_1/D$ ;  $k_2 = D/D_2$ ;  $D$  – диаметр посадки;  $D_1$  – внутренний диаметр вала;  $D_2$  – наружный диаметр втулки;  $\Delta$  – натяг в соединении.

Окончательное условие равномерности процесса запрессовки запишется в виде

$$(V_T^2 + \Delta V^2) P \geq K = \text{const}, \quad (7)$$

где  $K$  – постоянная величина, которая определяется по физико-механическим и геометрическим характеристикам соединения и зоны контакта:

$$K = \frac{0,43 S_H g [1 - \Phi(t)]^2 (2 - \mu) (R_{a1} + R_{a2}) \sigma_T^{5/3}}{(1 - \mu) (c - P_H^2)^{1/3}}, \quad (8)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона более мягкого материала деталей соединения;  $R_{a1}, R_{a2}$  – соответственно, характеристики шероховатости поверхностей деталей соединения;  $c$  – степень упрочнения поверхности контакта более мягкого из материалов деталей соединения,  $c = 2,8 \dots 3,6$ .

Таким образом, для проведения сборочного процесса при условии равномерного движения сопрягаемых деталей необходимо выдерживать соотношение между скоростью запрессовки и мощностью пресса в соответствии с условием (7), что может быть достигнуто за счет изменения скоростных и силовых параметров пресса, обеспечивающих получение значения  $\Delta V$ , достаточного для выполнения указанного условия.

Другим критерием, определяющим равномерность процесса сборки ССН, является критическая скорость, которая соответствует моменту прекращения движения пуансона пресса. Если скорость сборки больше критической, то процесс сборки происходит плавно без остановок.

Согласно [1], критическую скорость можно определить по формуле

$$v_K = \frac{\Delta F \omega}{k_0 (1 - 2\Theta) + 2\Theta(k + \hat{k})}, \quad (9)$$

где  $\omega = \sqrt{\frac{k_0 + k - \hat{k}}{m}}$  – собственная частота колебаний системы;

$\Theta = \frac{\beta}{2\sqrt{m(k_0 + k - \hat{k})}}$  – декремент затухания системы;  $k_0$  – жесткость

пресса;  $\hat{k}$  – коэффициент трения покоя;  $m$  – приведенная масса движущихся частей пресса и сопрягаемых деталей.

На фактическое значение критической скорости оказывает влияние целый ряд факторов: учитываемых и неучитываемых. Факторы, которые представлены в выражении (9), можно считать учитываемыми, при этом их физическая сущность обуславливает наличие поля разброса у каждого фактора. Теоретически погрешность при определении критической скорости можно определить по формуле

$$\Delta v_K = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial v_K}{\partial x_i} \Delta x_i, \quad (10)$$

где  $x_i \in X$  – множество параметров, входящих в (9);  $\Delta x_i$  – поле рассеивания значений  $i$ -го фактора.

Данные, приведенные в [1], показывают, что  $\Delta v_K$  может составлять 50–80 % от  $v_K$ . Следовательно, для гарантированного обеспечения плавности сборочного процесса фактически выбранная скорость должна превышать расчетную в 1,5–1,8 раза.

Скорость, развиваемая пуансоном гидравлического пресса, определяется по формуле [1]

$$v = v_{\max} - v_{\max} \frac{kL}{R_{\max}} > v_K, \quad (11)$$

где  $L$  – максимальная длина соединения;  $R_{\max}$  – максимальное усилие, развиваемое прессом.

Кроме того, следует отметить, что совместное решение уравнений (9) и (11) с целью обеспечения минимума какого-либо критерия (например, себестоимости сборки) позволяет найти оптимальное сочетание скорости сборки и максимального сборочного усилия, развиваемого прессом.

Таким образом, согласно условиям (7) и (11), при подборе оборудования для обеспечения постоянной скорости процесса прессования необходимо задавать максимальную скорость запрессовки. Это позволит значительно снизить мощность прессы и увеличить производительность при сборке, что снижает себестоимость процесса сборки.

При выборе оборудования необходимо, чтобы паспортное усилие прессы было в несколько раз больше, чем расчетное усилие. Это объясняется необходимостью создания некоторого "запаса мощности". Иначе при  $R_{\max} \cong R$  остановки и срывы в соединении наиболее вероятны. Достоинством данных методик является то, что они позволяют определить минимально необходимый "запас мощности". При эксплуатации любых прессов с гидравлическим приводом наибольшее усилие прессования принято ограничивать величиной 0,75–0,80 от паспортного значения усилия прессы. Этим нагружениям прессы соответствует давление в рабочем цилиндре (или цилиндрах, если их несколько)  $P = (0,75 \div 0,80)P_n$  [4]. Нижнее предельное значение скорости сборки ССН можно определить по формуле [1]

$$v \geq (1,5 \dots 1,8) v_K \frac{R_{\max}}{R_{\max} - kL}. \quad (12)$$

Определение верхнего предела скорости сборки зависит от учета технологических и конструкторских соображений, а также от требуемой производительности процесса сборки.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что, изменяя мощность прессы (за счет разработанной САУ, осуществляющей непрерывное регулирование расхода жидкости поступающего в рабочую полость гидроцилиндра прессы) можно обеспечить плавность сборочного процесса и повысить качество получаемых соединений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эрленков С.В., Симанин Н.А. Определение основных технологических параметров гидравлического прессы при сборке соединений с натягом // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1987. – № 9. – С. 153–157.
2. Курносов Н.Е. Конструктивно-технологическое обеспечение качества соединений с натягом : Дисс. ...док. техн. наук. – Пенза, 2002.
3. Эрленков С.В. Исследование связей качественных показателей неподвижных цилиндрических соединений с технологическим процессом их изготовления и принципы разработки оптимальной технологии : Дисс. ...канд. техн. наук. – М., 1982.
4. Гидравлические прессы / Под ред. Б.П. Васильева. – М. : Машиностроение, 1966. – 436 с.



УДК 67.05

**ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ**

© *А.В. Ланищиков, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

© *К.В. Воробьёв, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

**PNEUMATIC PISTON WRENCH**

© *A.V. Lanshchikov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *K.V. Vorobyev, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

Статья посвящена совершенствованию конструкции поршневого пневматического гайковёрта с храповой передачей с сохранением основных технических характеристик аналогов. Совершенствование конструкции за счёт изменения привода привело к снижению массы гайковёрта.

**Ключевые слова:** золотниковый распределитель, храповое колесо, поршень, шток.

The article is devoted to perfection of a design of the piston of the pneumatic torque tools with ratchet transfer of preserving the basic technical characteristics of analogues. Improving the design by changing the drive led to a decrease in weight of the wrench.

**Key words:** spool dispenser, ratchet, a piston rod.

**E-mail:** konstantinv58@gmail.com

В последние годы при сборке резьб все чаще используют поршневые гайковерты (преимущественно с гидроприводами), отличающиеся высоким к.п.д. (до 40–50 %) и малыми шумовыми параметрами и экологической чистотой. Их применяют в диапазоне крупных резьб (свыше М20), когда при сборке необходимо обеспечивать крутящие моменты свыше 200 Нм.

Применение гидропривода означает наличие гидростанции (давление свыше 20 МПа), а следовательно, и дополнительных материальных и других затрат. В то же время если использовать пневматический привод, эффективность устройств для сборки резьб может быть значительно повышена.

Так, например, если вместо ротационного пневмодвигателя использовать поршневой, отпадает необходимость в многоступенчатых планетарных редукторах, то есть снижается масса, особенно у гайковертов *ручного исполнения*, уровень шума и т.д. Данные положения подтверждают актуальность проблемы для технологии сборки.

На рис. 1–3 представлены конструкции поршневых гайковертов.

В устройстве решена задача увеличения ресурса контактирующих подвижных узлов, благодаря тому, что кассета одним шарниром соединена с гидроцилиндром через рычаг, входящий в сопряжение с поршнем гидроцилиндра, связки рычаг – поршень и собачка – храповое колесо приобретают несколько степеней свободы, что позволяет рационально распределяться возникающим нагрузкам на взаимодействующие поверхности и минимизировать силы, вызывающие изгиб и крутящие моменты в контактирующих элементах гайковерта.

Выполнение зубьев собачки и ответных межзубных впадин храпового колеса по цилиндрической поверхности сочленением нескольких радиусов позволяет получить зубья с утолщенной ножкой, что повышает несущую способность зуба, и обеспечить более плотное зацепление.

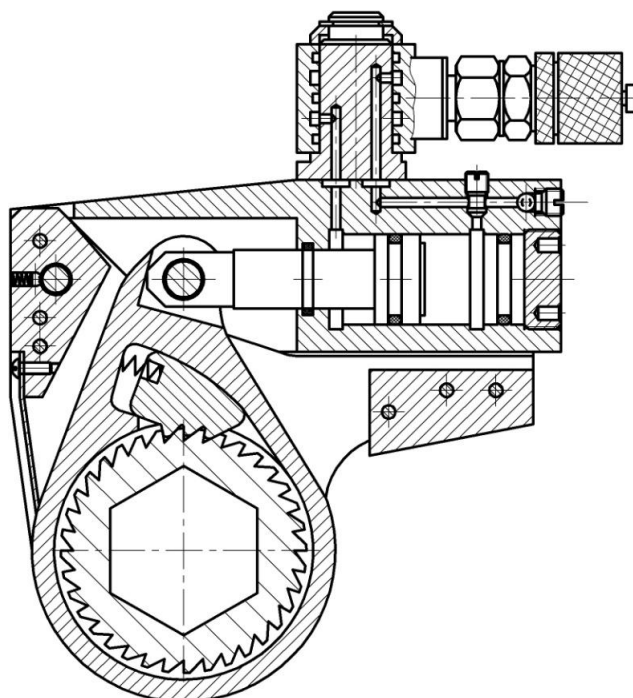


Рисунок 1 – Схема гидравлического гайковерта  
(патент РФ № 2247647)

На рис. 2 представлена более компактная конструкция гайковерта.

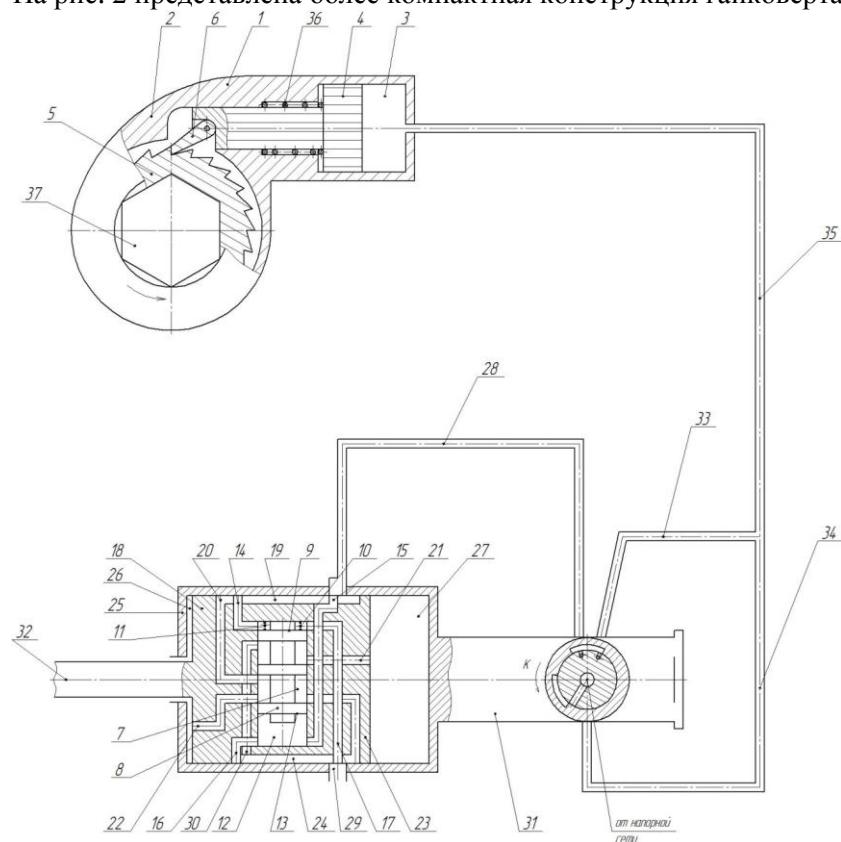


Рисунок 2 – Схема поршневого гайковерта (А.с. № 1082610)

## ПНЕВМАТИЧЕСКИЙ ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ

Недостатком устройства является наличие в конструкции перепускной системы золотникового распределительного клапана, что предопределяет сложность изготовления и другие дополнительные затраты.

На рис. 3 приведен пневматический гайковерт с кривошипом.

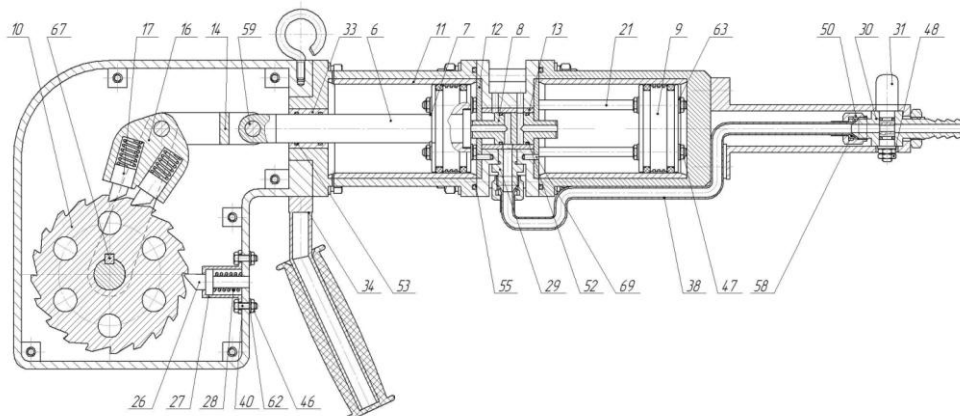


Рисунок 3 – Схема пневматического гайковерта с кривошипом  
(Патент РФ № 2444429, 2012 г.)

Недостатком устройства является наличие холостого хода поршня при движении его вправо, что значительно увеличивает продолжительность (время цикла) операции. Кроме того, применение в конструкции вентиля (поз. 31) делает его использование недостаточно удобным при эксплуатации.

Поэтому для повышения эффективности рабочего цикла представляется целесообразным доработать конструкцию золотникового распределителя, силового пневмоцилиндра и привода собачек храпового колеса.

На рис. 4 представлен модернизированный вариант конструкции пневматического поршневого гайковерта.

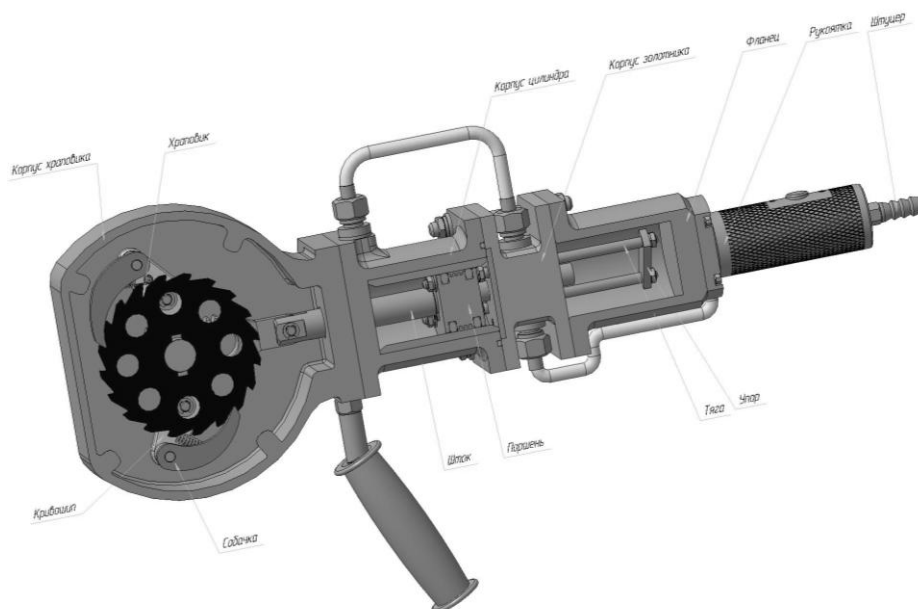


Рисунок 4 – Схема модернизированного пневматического поршневого гайковерта

При нажатии на пусковую кнопку через входной штуцер и медную трубку сжатый воздух ( $p = 0,5$  МПа) начинает поступать к управляющему золотнику. Проходя через левый канал, сжатый воздух попадает в правую рабочую полость корпуса силового цилиндра и начинает давить на поршень, который начинает перемещаться влево. При этом шток начинает воздействовать на рейку, которая за счёт зубчатого зацепления с кривошипами заставляет поворачиваться последние вокруг своей оси. Через свои оси кривошипы давят на две собачки, задавая им траекторию движения. Вершины зубьев храпового колеса входят в зацепление с первой собачкой, а вторая собачка проскальзывает. Храповое колесо при этом начинает вращаться вокруг своей оси.

Прилегание двух собачек к храповому колесу обеспечивается, соответственно, двумя пружинами. Одновременно с поршнем перемещается и упор за счёт двух тяг; при достижении поршнем крайнего левого положения, упор перемещает золотник влево, в результате чего перекрывается левый канал и прекращается подача воздуха в правую полость корпуса силового цилиндра, при этом сжатый воздух из левой полости корпуса силового цилиндра через отверстие в корпусе золотника стравливается в атмосферу.

Далее воздух из напорной линии через правый канал золотника и через штуцера и медную трубку поступает в крайнюю левую полость корпуса силового цилиндра и начинает перемещать поршень вправо до тех пор, пока поршень не переместит золотник; при этом сжатый воздух из правой полости корпуса силового цилиндра через отверстие в корпусе золотника стравливается в атмосферу. При этом шток воздействует на рейку, которая за счёт зубчатого зацепления с кривошипами заставляет их поворачиваться вокруг своей оси.

Затем через оси кривошипы давят на собачки, задавая им траекторию движения. Вершины зубьев храпового колеса входят в зацепление с первой собачкой, а вторая собачка проскальзывает. Храповое колесо начинает вращаться вокруг своей оси, реализуя процесс затяжки.

Цикл продолжается до достижения необходимого крутящего момента. При непрерывной подаче сжатого воздуха устройство будет работать в автоматическом цикле.

Таким образом, модернизация поршневого привода за счёт уменьшения первоначального количества деталей позволила упростить конструкцию и снизить массу самого гайковёрта.

Для оценки стабильности рабочего цикла и более полной оценки технологических возможностей устройства объективно необходимо и определение его основных технических характеристик: усилия, развиваемого на штоке пневмоцилиндра (при  $p = 0,5$  МПа), крутящего момента, определение габаритов и массы.

Исходя из конструктивных особенностей модернизированного устройства, за один рабочий ход поршня пневмоцилиндра храповое колесо поворачивается на два шага. Для определения фактических усилий рассмотрим два положения собачек относительно храпового колеса: в начальном и при повороте храпового колеса на один шаг.

Плечо силы составляет  $h = 45$  мм, откуда сила от действия крутящего момента (рис. 5)

$$P_{M_{кр}} = \frac{M_{кр}}{h} = \frac{80000}{45} = 1778 \text{ Н.}$$

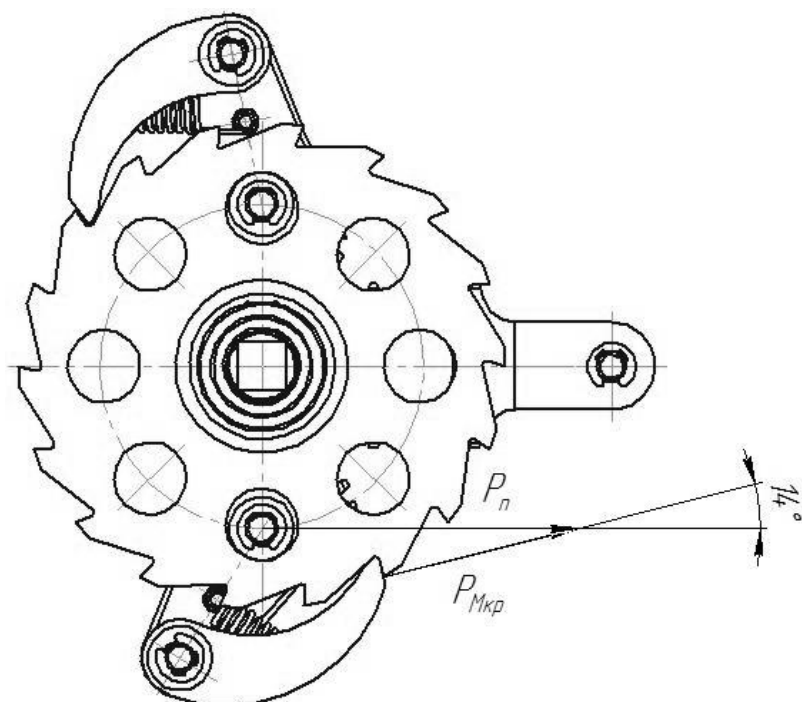


Рисунок 5 – Храповой механизм в начальном положении

Из рис. 5 следует, что сила, развиваемая штоком, будет составлять

$$P_n = \frac{P_{Mkp}}{\cos 14^\circ} = \frac{1778}{\cos 14^\circ} = 1832 \text{ Н.}$$

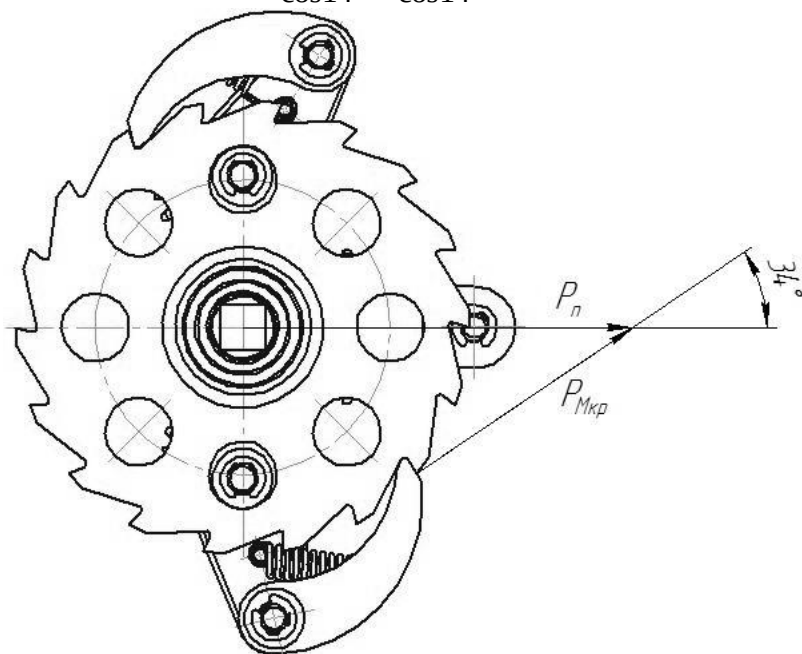


Рисунок 6 – Храповой механизм в конечном положении собачек

В конечном положении собачек храпового механизма гайковерта (рис. 6) сила, развиваемая штоком, будет составлять

$$P_n = \frac{P_{M_{кр}}}{\cos 34^\circ} = \frac{1778}{\cos 34^\circ} = 2145 \text{ Н.}$$

Следовательно, максимальное усилие, развиваемое поршнем, будет иметь место в конце движения и составлять  $P_n = 2145 \text{ Н.}$

Усилие, развиваемое на штоке пневмоцилиндра,

$$Q = pF_{\Pi},$$

где  $p$  – давление в пневмосети, МПа;

$F_{\Pi}$  – площадь поршня, мм<sup>2</sup>

$$F_{\Pi} = \frac{\pi D^2}{4},$$

где  $D$  – диаметр поршня, мм.

Исходя из вышеизложенного диаметр поршня (расчетный)

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi p}},$$

или

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 2145}{3,14 \cdot 500000}} = 74 \text{ мм.}$$

По стандартному ряду диаметров цилиндров (ГОСТ 6540–68) фактический диаметр поршня составит  $D = 80 \text{ мм.}$

Из конструктивных соображений диаметр штока составит 18 мм.

Тогда усилие, развиваемое поршнем гайковерта, составит

$$Q = 500000 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,080^2}{4} = 2512 \text{ Н.}$$

Таким образом, основные технические характеристики модернизированного пневматического гайковерта оказались следующими:

Частота вращения шпинделя –  $23,4 \text{ мин}^{-1}$ .

Максимальный момент затяжки –  $120 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (для 0,5 МПа).

Диаметр поршня – 80 мм.

Усилие на штоке – 2500 Н.

Ход поршня – 30 мм.

Габариты – 482x250x126 мм.

Масса – 8,7 кг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя : В 3-х т. – Т. 2. – 8-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2001. – 912 с. : ил.
2. Патент РФ № 2247647, В25В2100, Гидравлический гайковерт / Ганин Ф.Г., Творогов А.Г., Митюков А.А., Акчури Р.А., Пугин В.Г. – Оpubл. 10.03.2005.
3. Авторское свидетельство СССР № 1082610, В25В 21/00/Гайковерт Оpubл. 5.02.1984.
4. Патент РФ № 2444429, Поршневой гайковерт / Ланичиков А.В. (RU), Моисеев В.Б. (RU), Шаркевич К.С.(RU). – Б.И.-7, Оpubл. 10.03.12.

УДК 621.757

# К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАТЯЖКИ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ ПОРШНЕВЫМИ ГАЙКОВЕРТАМИ

© *Е.А. Колганов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

© *А.А. Селиверстов, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)*

© *М.В. Черкунов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

## TO A QUESTION OF RESEARCH OF PROCESS OF TIGHTENING OF THREADED CONNECTIONS BY THE PNEUMATIC PISTON NUT RUNNER

© *E.A. Kolganov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *A.A. Seliverstov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *M.V. Cherkunov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

Статья посвящена теоретическому исследованию процессов, происходящих в пневмоцилиндре поршневых пневматических гайковертов при затяжке резьбового соединения.

**Ключевые слова:** резьбовое соединение, затяжка, поршневой пневматический гайковерт, крутящий момент.

This article is devoted to the theoretical research of process occurring in a pneumatic cylinder pneumatic piston nut runner at an tightening of threaded connection.

**Key words:** threaded connection, tightening, pneumatic piston nut runner, torque.

**E-mail:** champ06@rambler.ru

В последнее время поршневые гайковерты с пневмоприводами все чаще используют для сборки средних резьб (М8-М16), в том числе и ответственных, благодаря более высокому к.п.д. и отсутствию в кинематике сложных планетарных редукторов [1]. Однако их характеристики и технологические возможности еще недостаточно исследованы.

Принцип работы поршневого гайковерта основан на преобразовании поступательного движения поршня пневмоцилиндра во вращательное движение выходного вала с помощью храпового механизма. Вращение с выходного вала передается через накидную гайку на затягиваемое резьбовое соединение.

В статье [2] показана расчетная схема поршневого гайковерта и приведена система уравнений, описывающая процессы, происходящие в пневмоцилиндре при затяжке резьбового соединения. На рис. 1 представлена расчетная схема поршневого гайковерта.

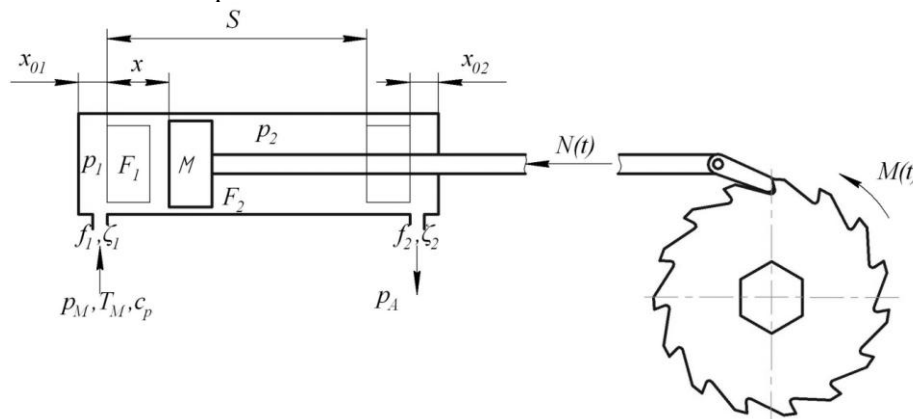


Рисунок 1 – Расчетная схема пневматического поршневого гайковерта

Система уравнений, описывающая процессы, происходящие в пневмоцилиндре, учитывающая переменное сопротивление со стороны резьбового соединения, возникающее при его затяжке, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} T \frac{d^2 x}{dt^2} &= p_1 F_1 - p_2 F_2 - p_A (F_1 - F_2) - M(t)r, \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{k f_1 \sqrt{RT_M}}{F_1 (x + x_{01}) \sqrt{\zeta_1}} \sqrt{p_M^2 - p_1^2} - \frac{k p_1}{x + x_{01}} \frac{dx}{dt}, \\ \frac{dp_2}{dt} &= - \frac{k f_2 \sqrt{RT_M}}{F_2 (S - x - x_{02}) \sqrt{\zeta_2}} \left( \frac{p_2}{p_M} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_2^2 - p_A^2} + \frac{k p_2}{(S - x - x_{02})} \frac{dx}{dt}, \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = x = 0, \text{ если } x \leq 0, \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = 0 \text{ и } x = S, \text{ если } x \geq S, \end{aligned} \right\}$$

где  $T$  – масса подвижных частей пневмоцилиндра,

$p_1$  – давление в бесштоковой полости пневмоцилиндра,

$p_2$  – давление в штоковой полости пневмоцилиндра,

$p_M$  – давление в магистрали,

$p_A$  – атмосферное давление,

$F_1$  – площадь поперечного сечения поршня в бесштоковой полости,

$F_2$  – площадь поперечного сечения поршня в штоковой полости,

$k = c_p/c_v$ ,

$c_p$  – удельная теплоемкость,

$c_v$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме,

$f_1$  – площадь проходного сечения в бесштоковой полости,

$\zeta_1$  – коэффициент сопротивления линии в бесштоковой полости,

$x$  – координата положения поршня,

$x_0$  – приведенная координата, характеризующая объем вредного пространства,

$S$  – максимальный ход поршня,

$f_2$  – площадь проходного сечения в штоковой полости,

$\zeta_2$  – коэффициент сопротивления линии в штоковой полости,

$M(t)$  – крутящий момент, требуемый для затяжки гайки,

$r$  – радиус храпового колеса.

Решая данную систему уравнений с помощью системы Mathcad для определенных параметров, можно получить зависимости, раскрывающие суть процессов, происходящих при затяжке резьбового соединения.

На рис. 2 представлены графики изменения давления в бесштоковой полости пневмоцилиндра  $p_1$  при различных значениях магистрального давления  $p_M$ .



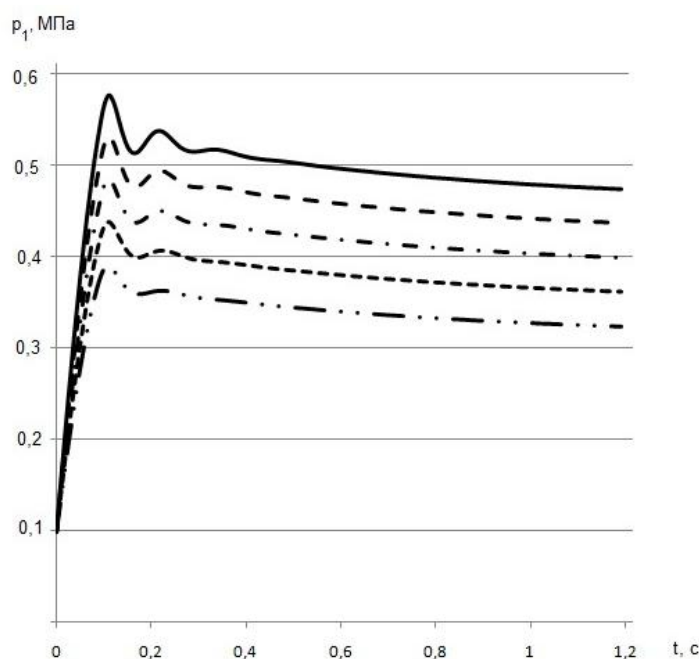
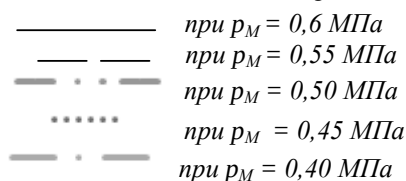


Рисунок 2 – Графики изменения давления в бесштоковой полости пневмоцилиндра  $p_1$  при различных значениях магистрального давления  $p_M$



На графике видны резкие скачки давления  $p_1$  в начальный момент времени и последующие небольшие колебания. Резкий скачок давления сказывается на изменении скорости перемещения поршня.

На рис. 3 представлены графики изменения скорости перемещения поршня пневмоцилиндра  $V$  при различных значениях магистрального давления  $p_M$ .

На графике виден резкий скачок скорости в начальный момент времени, обусловленный скачком давления  $p_1$ , видным на рис. 2. После резкого скачка видны небольшие колебания скорости и последующее ее выравнивание. Данный график построен для начального момента затяжки, когда сопротивления со стороны резьбового соединения еще сравнительно малы. При увеличении крутящего момента, необходимого для затяжки резьбового соединения, скорость начнет плавно падать и станет равной нулю при максимальном крутящем моменте.

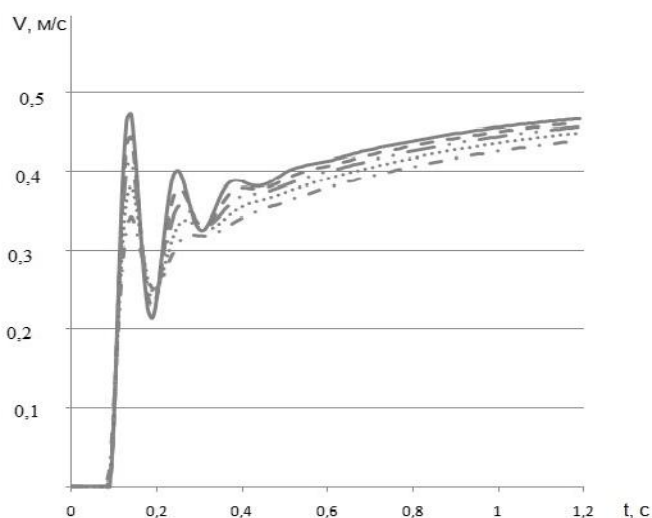
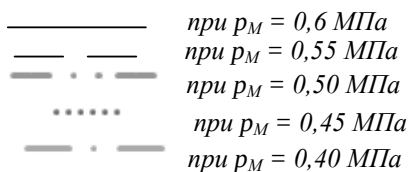


Рисунок 3 – Графики изменения скорости перемещения поршня пневмоцилиндра  $V$  при различных значениях магистрального давления  $p_M$



На изменение скорости перемещения поршня большое влияние оказывает величина входного сечения в штоковой и бесштоковой полостях пневмоцилиндра. На рис. 4 показаны графики изменения скорости перемещения поршня пневмоцилиндра  $V$  при различных диаметрах входного отверстия в бесштоковую полость пневмоцилиндра (при постоянном давлении в магистрали). То есть величину скорости можно регулировать изменением входного сечения с помощью пневмодресселя.

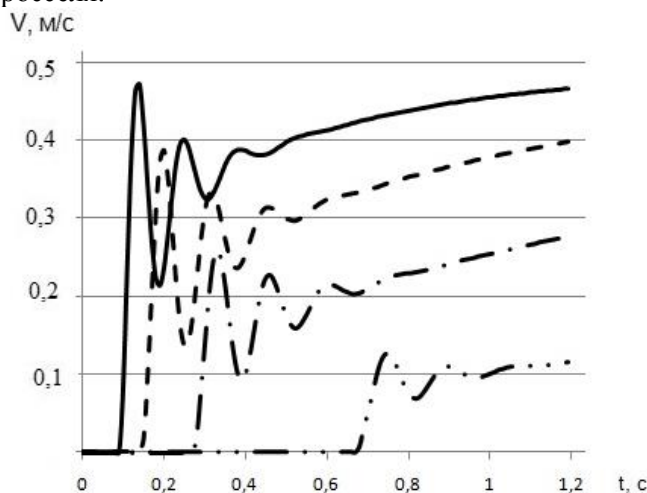
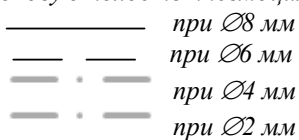


Рисунок 4 – Графики изменения скорости перемещения поршня пневмоцилиндра  $V$  при различных диаметрах входного отверстия в бесштоковую полость пневмоцилиндра



Таким образом, с помощью системы уравнений, описывающих процессы, происходящие в пневмоцилиндре при затяжке резьбового соединения, можно получить различные графики, необходимые для настройки гайковерта на необходимые параметры, например на необходимую скорость затяжки. Такие графики можно получить для каждого конкретного параметров пневматического гайковерта, параметров пневмосистемы и резьбового соединения.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ланициков А.В., Моисеев В.Б. *Технология автоматизированной сборки резьбовых соединений* : Монография. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1999. – 260 с.
2. Ланициков А.В., Колганов Е.А. *К вопросу затяжки резьбовых соединений пневматическими поршневыми гайковертами* // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2012. – № 1. – С. 20–22.

**УДК 681.3.067**

#### **ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ С ИЗМЕНЕННОЙ РЕЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ**

© **А.В. Ланициков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **С.И. Пижонков**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### **WRENCH PISTON WITH THE CHANGE RACK GEARS**

© **A.V. Lanschikov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **S.I. Pizhonkov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Статья посвящена вопросам повышения качества и эффективности операций механизированной и автоматизированной сборки резьбовых соединений. Рассмотрены конструктивные особенности созданного переносного варианта конструкции двухшпиндельного поршневого гайковерта, в котором храповая передача выполнена в виде двух измененных зубчатых колес.

**Ключевые слова:** резьбовые соединения, сборочный процесс, поршневой гайковерт, механизация, автоматизация, речная передача.

The article is dedicated to enhancing the quality and efficiency of operations, mechanized and automated assembly of threaded connections. Design features of embodiment established portable duplex piston wrench, wherein the ratchet gear comprises two gears changed.

**Key words:** screw connections, assembly process, the piston wrench, mechanization, automation, rack gear.

**E-mail:** dexter1344@gmail.com; lan1956@list.ru

Сборка является завершающим этапом производственного процесса в машиностроении и во многом определяет качество изготавливаемой продукции. Особое место в конструкциях и технологии сборки машин занимают резьбовые соединения (РС).

Широкое применение РС в конструкциях машин требует значительных трудозатрат на их сборку. В настоящее время трудоемкость сборки РС по различным отраслям машиностроения достигает до 50 % и более от всего объема сборочных работ, в основном из-за сложности обеспечения качества.

За последние 20 лет по патентно-технической литературе прослеживается устойчивая тенденция по разработке и созданию гайковертов с поршневыми приводами, отличающихся от гайковертов ротационного типа большим к.п.д.

(до 40–50 %), малыми шумовыми параметрами и экологической чистотой, что делает их весьма привлекательными для любых условий эксплуатации.

На рис. 1 представлена схема гайковерта по А.С. СССР № 1609635.

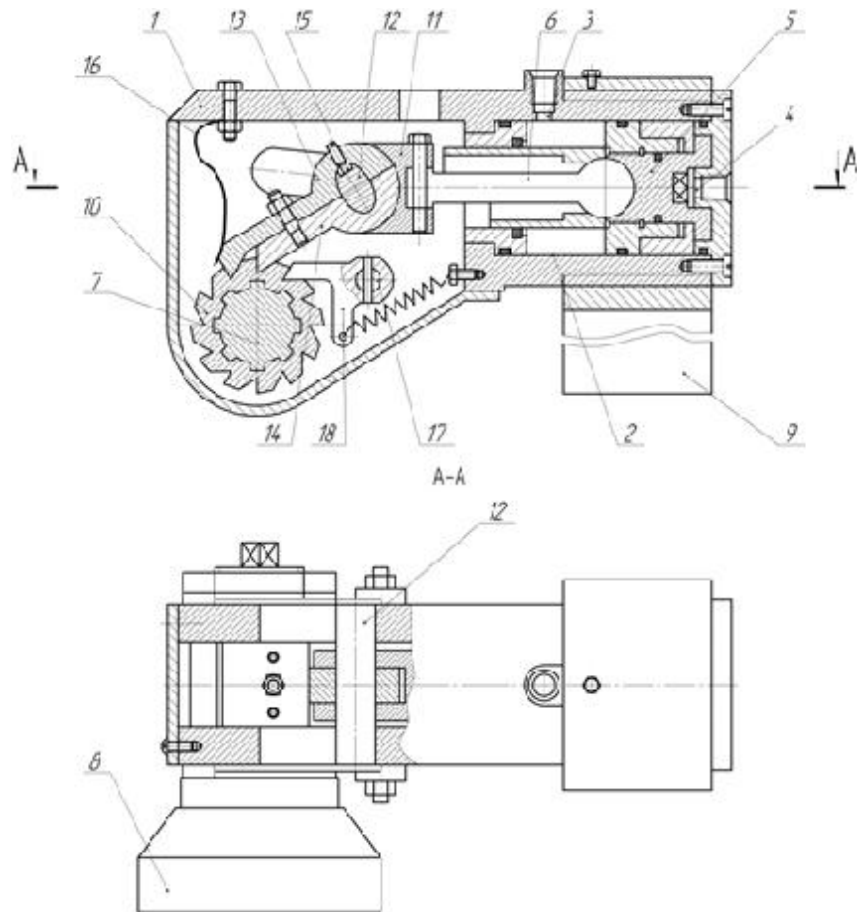


Рисунок 1 – Схема гайковерта по А.С. СССР № 1609635

Принцип действия данного гайковерта заключается в следующем: под давлением, создаваемым насосом, рабочая жидкость через канал 4 поступает в рабочую полость и начинает перемещать поршень 5 со штоком 6. Последний через проушину 11 передает движение пальцу 12, через эллипсный участок которого передается движение половинам 13 и 14 храповой собачки, которые передают движение храповому колесу 10 со шпинделем 7. Сменный ключ 8, установленный на шпиндель 7, осуществляет затяжку резьбового соединения.

Недостатком данного гайковерта являются его большие габариты и масса, сложность конструкции, что делает его трудно эксплуатируемым в работе, а также невысокая надежность храпового механизма. Данным гайковертом сложно работать в стесненных условиях, а если конец болта или шпильки далеко выступает за верхнюю поверхность откручиваемой гайки, её невозможно открутить данным гайковертом вообще. Большие габариты и масса гайковерта объясняются наличием значительного количества дополнительных узлов и деталей, а невысокая надежность – сложностью узлов крепления и обеспечения перемещения силовой собачки. Так, соединение двух половин собачки осуществляется при помощи шпильки, а так как при работе гайковерта эллипсная часть оси давит на обе половинки собачки, то в шпильке возникают большие напряжения,

## ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ С ИЗМЕНЕННОЙ РЕЕЧНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

что приводит к ее растяжению и, как следствие, деформации половинок собачки. Кроме того, в сквозном резьбовом отверстии размещен упор с концом, выходящим в полукруглый канал, который предназначен для периодического взаимодействия со сторонами секторного паза, однако это взаимодействие идет по линии, а не по площадке, что вызывает большую концентрацию напряжений в нем и его быстрое разрушение.

На рис. 2 представлена схема гайковерта.

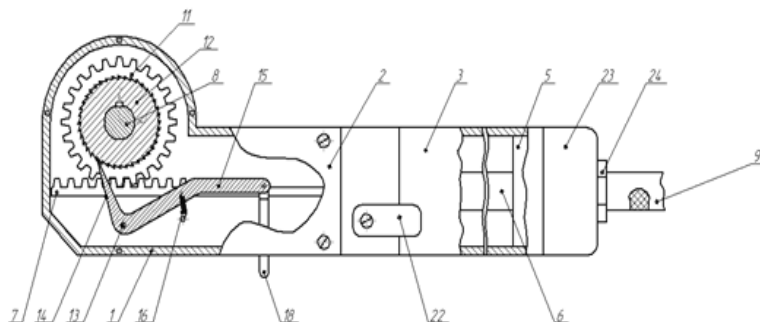


Рисунок 2 – Схема гайковерта с реечно-зубчатой передачей

При нажатии на кнопку 22 сжатый воздух (0,5 МПа) от пневмомагистрали поступает в надпоршневую полость силового цилиндра и перемещает поршень 5 со штоком 6 справа налево, а связанная с последней рейка 7 начинает вращать зубчатое колесо 11, вал 8 с накатным ключом в сторону затяжки резьбового соединения. При этом собачка 15 зафиксирован достигнутый угол поворота с помощью храповика 12. При нажатии на кнопку 18 и левую (запоршневую) полость силового цилиндра и шток 6 с поршнем 5 возвращается в исходное положение. На этом рабочий цикл закончен, и при повторном нажатии на кнопку 22 процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут заданный угол поворота при затяжке резьбового соединения.

Недостатком данного пневматического поршневого гайковерта является наличие холостого хода поршня при движении его вправо, что значительно увеличивает время сборки резьбовых соединений.

На рис. 3 представлен пневматический гайковерт с кривошипом.

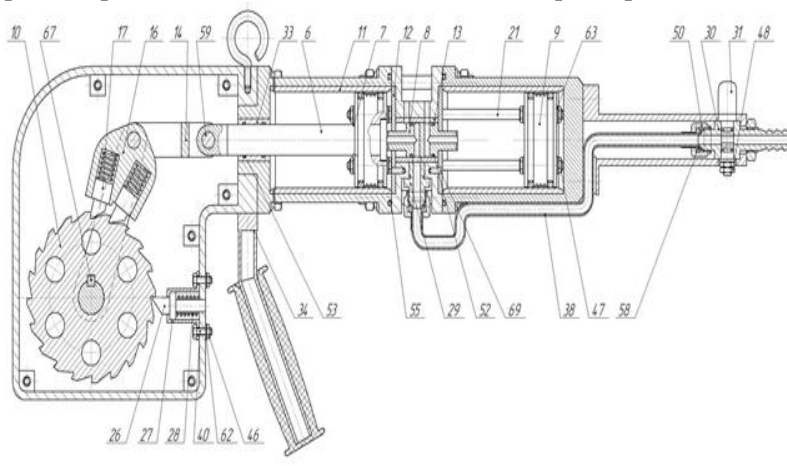


Рисунок 3 – Схема пневматического гайковерта с кривошипом  
(Патент РФ № 2444429, 2012 г.)

Недостатком конструкции является наличие холостого хода поршня при движении его вправо, что значительно увеличивает продолжительность (время) операции сборки резьбовых соединений.

На рис. 4, 5 представлен вариант конструкции двухшпindelного пневматического поршневого гайковерта.



Рисунок 4 – Обиций вид поршневого гайковерта

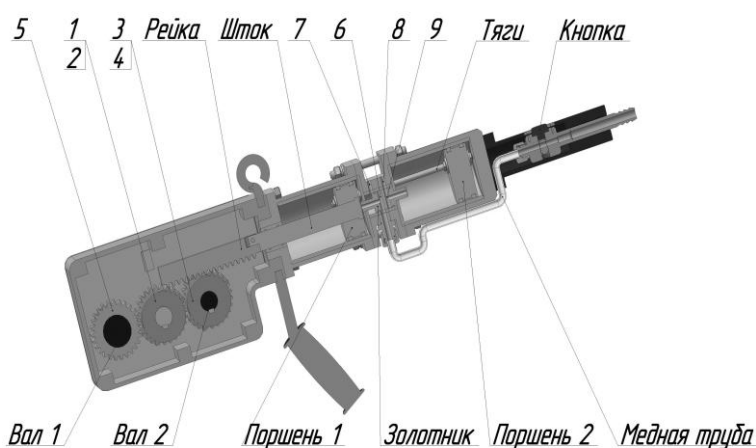


Рисунок 5 – 3D-модель модернизированного пневматического гайковерта

Гайковерт подсоединяют к пневмомагистрالي. При нажатии кнопки через медную трубу воздух начинает поступать к золотнику. Через канал 6 воздух поступает в рабочую полость цилиндра и давит на поршень 1. Поршень 1 начинает перемещаться влево. Шток воздействует на рейку, которая, в свою очередь, воздействует на зубчатое колесо 1, которое вращает вал с колесом 2. Колесо 2 в зацеплении с колесом 4 и 5. Колесо 5 вращает вал 1. Колесо 4, в свою очередь, вращает вал 2 с колесом 2. В конце движения рейки влево колесо 1 выходит из зацепления рейки. Одновременно с поршнем 1 перемещается поршень 2 за счет тяг. При достижении поршнем 1 крайнего положения поршень 2 перемещает золотник влево, в результате чего перекрывается канал 6, воздух перестает поступать в полость пневмоцилиндра и уходит в атмосферу через отверстие 7 в корпусе золотника. Воздух из напорной линии через канал 9 поступает в полость цилиндра и начинает перемещать поршень 2 вправо до тех пор, пока поршень 1 не сдвинет золотник. В результате канал 6 объединяется с напорной линией, а воздух из полости цилиндра через отверстие 8 в корпусе золотника стравливается в атмосферу. При обратном ходе поршня 1 рейка вступает в зацепление с колесом 2, которое, в свою очередь, через колеса 3 и 5 вращает колесо 3 вместе с выходным валом 2. Цикл продолжается до достижения необходи-

мого крутящего момента. При непрерывной подаче воздуха устройство работает в автоматическом режиме.

Технической задачей предлагаемой конструкции является уменьшение трудозатрат на сборку резьбовых соединений, сведение к минимуму ручных операций при сборке резьбовых соединений, механизация линий сборки в условиях серийного и массового производства.

Применение измененной реечной передачи позволяет исключить холостой ход поршня, что повышает эффективность конструкции гайковерта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2247647, B25B2100, Гидравлический гайковерт / Ганин Ф.Г., Творогов А.Г., Митюков А.А., Акчурин Р.А., Пугин В.Г. – Оpubл. 10.03.2005 г.
2. Авторское свидетельство СССР № 1082610, B25B 21/00/ Гайковерт. – Оpubл. 5.02.1984 г.
3. Патент РФ № 2444429, Поршневой гайковерт / Ланищиков А.В. (RU), Моисеев В.Б. (RU), Шаркевич К.С. (RU). – Б.И.-7, Оpubл. 10.03.12 г.

УДК 681.523.4

### ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

© **В.В. Голубовский**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

© **С.Г. Прохоров**, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

### HYDRAULIC SYSTEM OF AUTOMATIC PROCESS CONTROL ASSEMBLY PARTS PLASTIC DEFORMATION

© **V.V. Golubovsky**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **S.G. Prokhorov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Статья посвящена разработке оригинальной конструкции инерционного измерительного преобразователя линейных ускорений и системы автоматического управления гидравлическим приводом прессы для сборки соединений с натягом.

**Ключевые слова:** гидравлическая система автоматического управления, инерционный измерительный преобразователь.

The article is devoted to the development of original design of the inertial measuring transducer linear acceleration and systems for automatic control of hydraulic drive presses for assembly tensed connections

**Key words:** hydraulic with automatic control system, inertial measuring transducer.

**E-mail:** v.golubovsky@mail.ru; prosergen@mail.ru.

Для обеспечения неподвижных соединений деталей широко используют сборку пластическим деформированием (сборку с натягом).

Сборка соединений с натягом часто характеризуется неравномерным, скачкообразным относительным движением сопрягаемых деталей [1, с. 153]. Физическая сущность такого явления заключается в том, что для движения вала относительно втулки необходимо подвести некоторую энергию, превосходящую по величине потенциальную энергию сцепления (схватывания) контактирующих поверхностей. Если подводимая энергия имеет один порядок с энергией сцепления,

то наблюдается указанный выше закон движения при сборке, что приводит к нежелательным последствиям. В частности, в таких случаях чаще всего наблюдается повреждение контактирующих поверхностей при сборке ввиду того, что скорость удаления окисных пленок при резком перемещении вала относительно втулки оказывается больше скорости образования этих пленок. Кроме того, неравномерное движение при сборке приводит к значительным ударным нагрузкам и преждевременному выходу из строя технологического оборудования.

Таким образом, чем больше скорость отдельных срывов, тем больше шаг дискретного движения, выше погрешность процесса сборки и ниже качество соединения. Из этого следует, что основным условием, обеспечивающим плавность сборочного процесса, является обеспечение равенства нулю ускорения движущихся частей. Последнее возможно при использовании систем автоматического управления (САУ) процессом сборки.

Следует отметить, что обычно сборка соединений с натягом производится на гидравлических прессах, следовательно, создание систем управления для данного вида технологического оборудования может быть актуальным.

По мнению авторов, в настоящее время наибольшее применение должны найти относительно простые системы управления, причем целесообразным представляется создание САУ, использующих один вид энергии. Для оборудования, имеющего гидравлические приводы, необходима разработка гидравлических САУ, использующих единую рабочую среду – минеральное масло. В таких системах отпадает необходимость многократных преобразований сигнала, несущего информацию о ходе технологического процесса, из одного вида энергии в другой, что существенно снижает погрешности измерений и положительно сказывается на качестве самой системы. Подобные САУ могут создаваться на базе стандартных элементов, что делает их сравнительно простыми и дешевыми, а также дает возможность оснащать ими существующее оборудование без каких-либо значительных конструктивных изменений.

Особое внимание при создании САУ параметрами движения привода должно быть уделено разработке чувствительных элементов – измерительных преобразователей, так как их характеристики существенно влияют на характеристики системы в целом.

При участии авторов создан, прошел испытания и промышленную апробацию инерционный измерительный преобразователь линейных ускорений, предназначенный для использования в САУ гидравлическими приводами технологического оборудования при поступательном движении рабочих органов [2]. Неравномерность движения рабочего органа устраняется путем выработки автоматическим регулятором управляющего воздействия, направленного на скорейший переход от ускоренного или замедленного движения к установившемуся.

Конструкция и общий вид опытного образца инерционного измерительного преобразователя ускорений приведены на рис. 1 и 2.



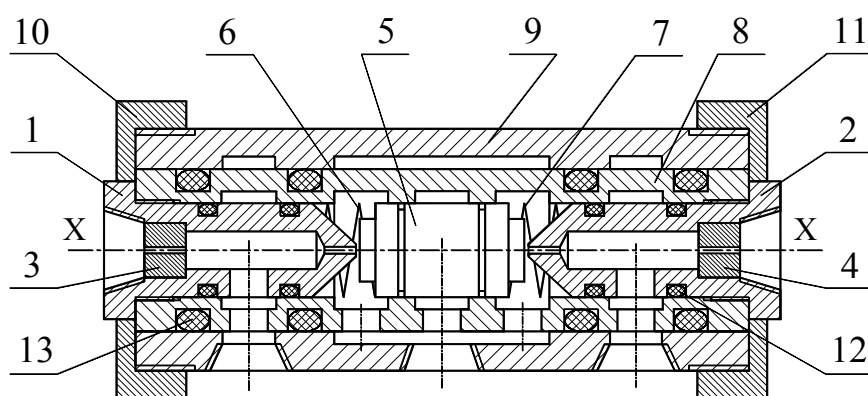


Рисунок 1 – Конструкция измерительного преобразователя ускорений типа сопло – заслонка

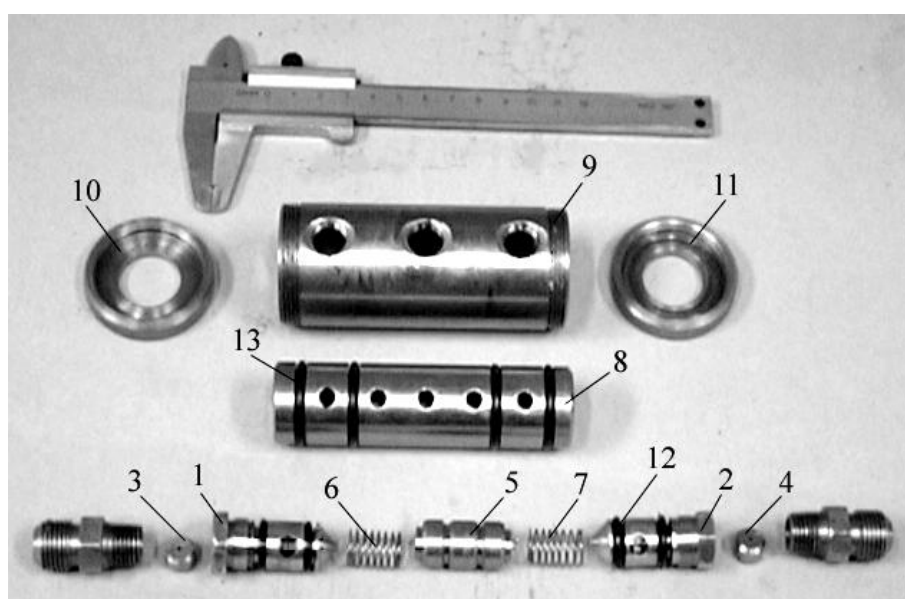


Рисунок 2 – Общий вид инерционного измерительного преобразователя ускорений типа сопло – заслонка

Чувствительный элемент, или собственно преобразователь, представляет собой унифицированный патрон, содержащий сопла 1 и 2, дроссели 3 и 4 с постоянным проходным сечением, инерционную заслонку 5, центрирующие пружины 6 и 7, втулку 8 и четыре пары уплотнительных колец 12 и 13. Патрон помещен в корпус 9, закрытый с торцов крышками 10 и 11.

Измерительный преобразователь устанавливают на подвижном рабочем органе машины в любом удобном месте таким образом, чтобы его ось чувствительности X – X (ось, по которой действует измеряемое ускорение) совпадала с направлением движения.

Измерительный преобразователь работает следующим образом.

При отсутствии линейного ускорения (рабочий орган машины неподвижен или перемещается с равномерной скоростью) инерционная заслонка 5 находится в равновесии под действием упругих сил, создаваемых центрирующими пружинами 6 и 7, и занимает симметричное положение в центре втулки 8. Рабочая жидкость (масло) из напорной линии единой гидросистемы пресса поступает через постоянные дроссели 3 и 4 в рабочие камеры сопел 1 и 2, а затем, пройдя сопротивления в

виде зазоров между торцами сопел и заслонки, сливается в бак. Так как в рассматриваемом случае сопротивления истечению рабочей жидкости из сопел 1 и 2 одинаковы, то разность давлений в рабочих камерах отсутствует ( $P_1 = P_2$ ).

При возникновении линейного ускорения (ускоренное или замедленное движение рабочего органа), направленного вдоль оси чувствительности измерительного преобразователя (например, вправо) заслонка под действием силы инерции перемещается влево и изменяет сопротивление истечению рабочей жидкости из сопел. Сопротивление истечению из сопла 1 увеличивается, а из сопла 2 уменьшается, что приводит к соответствующему изменению давлений в рабочих камерах ( $P_1 > P_2$ ). Возникающая разность давлений может быть использована как возмущающий сигнал на входе управляющего элемента САУ, например изменение давлений на торцах золотника дросселирующего гидрораспределителя.

При изменении направления ускорения на противоположное заслонка смещается вправо от среднего положения. Сопротивление истечению масла из сопла 2 увеличивается, а из сопла 1 уменьшается, что вызывает соответствующее изменение давлений в рабочих камерах ( $P_2 > P_1$ ).

Представленная конструкция инерционного измерительного преобразователя позволяет производить его переналадку и настройку на требуемый диапазон измеряемых ускорений. Переналадка возможна за счет изменения массы инерционной заслонки и жесткости центрирующих пружин. Настройка преобразователя осуществляется установкой заданных зазоров между торцами сопел и заслонкой путем осевого смещения сопел по резьбе.

Следует отметить, что установка сопел во втулке на резьбе ведет к некоторому увеличению радиальных размеров деталей преобразователя и необходимости применения уплотнений для устранения утечек, однако посадка сопел во втулку с натягом делает невозможными переналадку и настройку и снижает ремонтопригодность всей конструкции.

На базе рассмотренного выше измерительного преобразователя ускорений создана и прошла испытания гидравлическая САУ приводом пресса, обеспечивающая равномерное относительное движение контактирующих поверхностей деталей при сборке соединений с натягом. Ее принципиальная схема приведена на рис. 3.

Основными элементами САУ являются оригинальный инерционный измерительный преобразователь 1 линейных ускорений типа сопло – заслонка, выполненный по мостовой схеме и широко используемый в следящих гидроприводах, четырехщелевой дросселирующий распределитель 2, включенный в диагональ моста преобразователя и осуществляющий дросселирование потока масла на входе и выходе цилиндра 3 пресса. Корпус измерительного преобразователя 1 посредством жесткой связи 4 соединен с подвижными частями пресса (штоком цилиндра 3), что обычно обеспечивается креплением корпуса преобразователя на подвижной части пресса в любом удобном месте. Питание измерительного преобразователя и цилиндра пресса осуществляется от одного источника – насосной станции, причем давление  $P$  масла на входе преобразователя настраивается редукционным клапаном 7, а  $P_H$  в линии питания цилиндра предохранительным клапаном (на рис. 3 не показан). Необходимая скорость движения вала 5 относительно втулки 6 собираемого соединения настраивается путем смещения золотника распределителя 2 из среднего положения (на рис. 3 влево) за счет соответствующей регулировки центрирующих пружин.

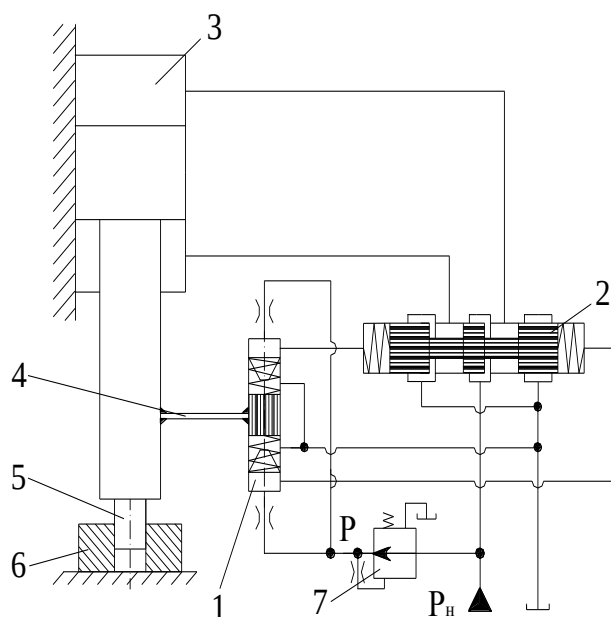


Рисунок 3 – Принципиальная схема гидравлической САУ приводом пресса

Если в процессе работы пресса возникает неравномерность движения, то заслонка измерительного преобразователя смещается из нейтрального положения и изменяет сопротивления истечению масла из сопла. Последнее приводит к возникновению разности давлений под торцами золотника дросселирующего распределителя. Смещение золотника приводит к изменению расхода масла, подводимого к цилиндру и отводимого от него, что обеспечивает переход от ускоренного или замедленного движения к установившемуся.

Как показали испытания, обеспечение равенства нулю ускорения движущихся частей при сборке соединений с натягом повышает плавность сборочного процесса и качество соединения.

Подобными САУ может оснащаться как вновь проектируемое, так и уже существующее оборудование. Причем в последнем случае модернизация не требует серьезных конструктивных изменений оборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эрленков С.В., Симанин Н.А. Определение основных технологических параметров гидравлического пресса при сборке соединений с натягом // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – № 9. – 1987. – С. 153–157.

2. Измерительный преобразователь ускорений типа сопло – заслонка / В.О. Трилесский, Н.А. Симанин, С.Б. Демин, В.В. Голубовский. – Патент РФ № 2150116, G 01 P 15/00, 2000.

УДК 681.3.067

### ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ С КРИВОШИПОМ

© А.В. Ланищиков, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© А.А. Якомазов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

### WRENCH PISTON WITH THE CRANK

© A.V. Lanschikov, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© A.A. Yakomazov, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Статья посвящена вопросам повышения качества и эффективности операций механизированной и автоматизированной сборки резьбовых соединений. Рассмотрены конструктивные особенности созданного переносного варианта конструкции двухшпиндельного поршневого гайковерта с храповой передачей.

**Ключевые слова:** резьбовые соединения, сборочный процесс, пневматический гайковерт, механизация, храповая передача, кривошип.

The article is dedicated to enhancing the quality and efficiency of operations, mechanized and automated assembly of threaded connections. Design features of the design to create a portable version of a duplex reciprocating ratchet wrench with transmission.

**Key words:** threaded connections, assembly process, pneumatic wrench, mechanization, the ratchet gear, crank.

**E-mail:** work.yakomazov@gmail.com; lan1956@list.ru

Резьбовые соединения (РС) составляют 25–30 % от всех других в машиностроении.

Трудоемкость их сборки достигает 50 % от всего объема сборочных работ. Поэтому в последние годы стали чаще использовать устройства с поршневым приводом не только на основе гидравлики, но и на основе пневматики.

В последние годы по патентно-технической литературе прослеживается тенденция по использованию гайковертов с поршневыми приводами, отличающихся высоким к.п.д. (до 40–50 %), малыми шумовыми параметрами и экологической чистотой.

На рис. 1, 2 представлены некоторые конструкции пневматических поршневых гайковертов.

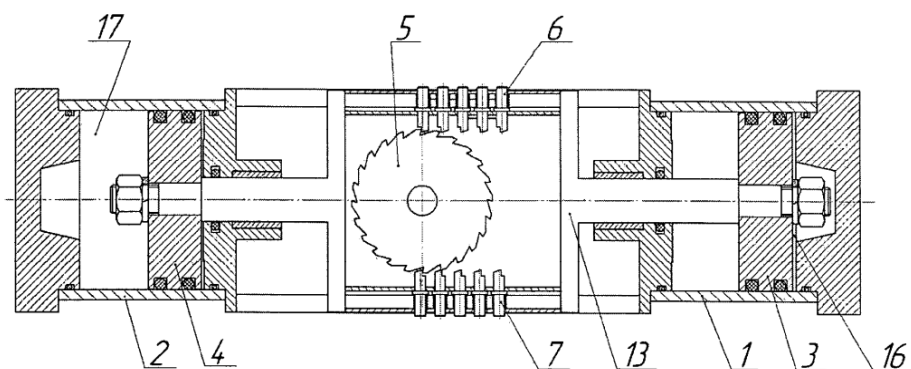


Рисунок 1 – Схема пневматического гайковерта  
(патент РФ № 2444430, 2012 г.)

Недостатками устройства являются его большие габариты и масса, сложность конструкции, применимость только для стационарных гайковертов.

## ПОРШНЕВОЙ ГАЙКОВЕРТ С КРИВОШИПОМ

На рис. 2 представлен пневматический гайковерт с кривошипом, также разработанный на кафедре ТОРП ПГТА.

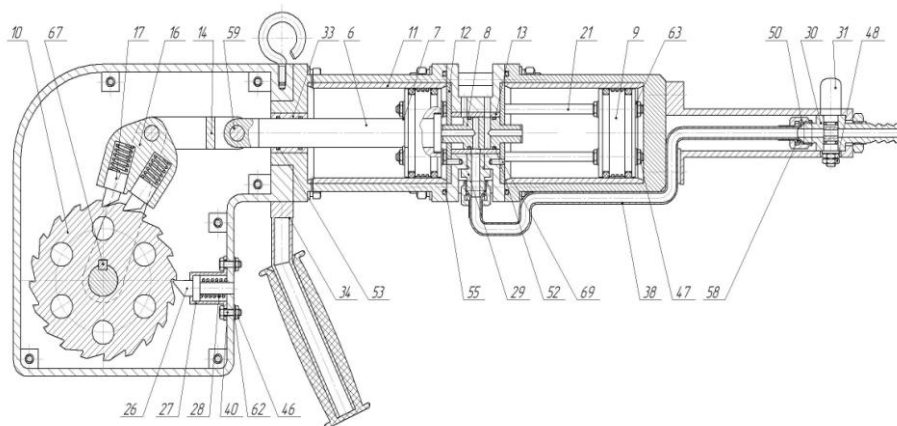


Рисунок 2 – Схема пневматического гайковерта с кривошипом  
(патент РФ № 2444429, 2012 г.)

Недостатком данного пневматического поршневого гайковерта является наличие холостого хода поршня при движении его вправо, что значительно увеличивает время сборки резьбовых соединений. Кроме того, применение в конструкции вентиля (поз. 31) делает использование данного гайковерта недостаточно удобным при эксплуатации.

На рис. 3 представлен внешний вид поршневого гайковерта.



Рисунок 3 – Внешний вид поршневого гайковерта

На основании изложенного можно сделать частный вывод о возможности создания и многошпиндельных конструкций.

На рис. 4, 5 и 6 представлен вариант многошпиндельного пневматического гайковерта, который способен развивать крутящий момент до 100-150 Нм.

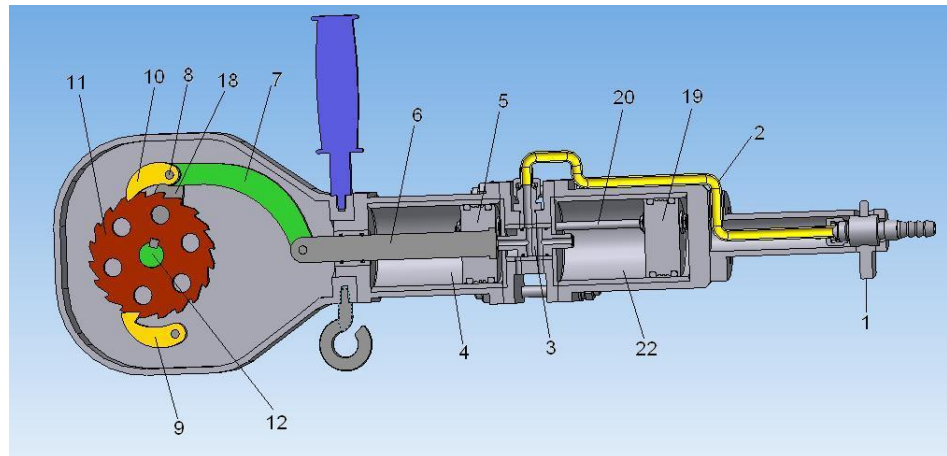


Рисунок 4 – Продольный разрез модели разработанного гайковерта

Гайковерт подсоединяют к питающей пневмомагистральной. При повороте вентиля 1 через медную трубу 2 сжатый воздух ( $p = 0,4-0,6$  МПа) начинает поступать к золотнику 3. Проходя через левый канал, сжатый воздух попадает в левую рабочую полость силового цилиндра 4 и давит на поршень 5, который перемещается влево. При этом шток 6 начинает воздействовать на звенья 7 (второе звено 7 условно не показано), которые через оси 8 давят на собачки 9, 10. Вершины зубьев храпового колеса 11 входят в зацепление с собачкой 10, собачка 9 проскальзывает. Траекторию движения собачек 9, 10, соосную с храповым колесом 11, задают два кривошипа 18. Храповое колесо 11, вал 12 (который является одним из выходных шпинделей) и зубчатое колесо 13 начинают вращаться вокруг своей оси. Зубчатое колесо 13 входит в зацепление с промежуточным зубчатым колесом 14, зубчатое колесо 14 в это время входит в зацепление с зубчатым колесом 15. Вал 16 начинает вращаться вокруг своей оси. Фиксация зубчатых колес 13, 14, 15 на оси вала от продольного смещения обеспечивается регулировочными шайбами 17. Одновременно с поршнем 5 перемещается и поршень 19 за счет тяг 20 (вторя тяга 20 условно не показана); при достижении поршнем 5 крайнего левого положения поршень 19 перемещает золотник 3 влево, в результате чего перекрывается левый канал и прекращается подача воздуха в полость цилиндра 4, который стравливается в атмосферу через отверстие в корпусе золотника. Далее воздух из напорной линии через правый канал поступает в полость цилиндра 22 и начинает перемещать поршень 5 вправо до тех пор, пока поршень 19 не сдвинет золотник 3; при этом левый канал объединяется с напорной линией, а сжатый воздух из полости цилиндра 4 через отверстие в корпусе золотника стравливается в атмосферу. При этом шток 6, воздействуя на звенья 7 (второе звено 7 условно не показано), через оси 8 тянет собачки 9, 10. Вершины зубьев храпового колеса 11 входят в зацепление с собачкой 9, собачка 10 проскальзывает. Храповое колесо 11, вал 12 (который является вторым выходным шпинделем) и зубчатое колесо 13 начинают вращаться вокруг своей оси. Зубчатое колесо 13 входит в зацепление с промежуточным зубчатым колесом 14, которое в это время входит в зацепление с зубчатым колесом 15. Вал 16 (который является вторым выходным шпинделем) начинает вращаться вокруг своей оси.

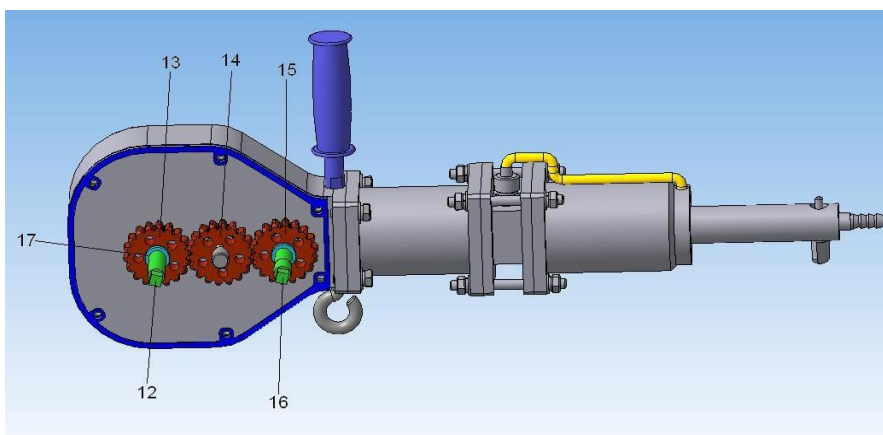


Рисунок 5 – Разработанная модель гайковерта с исключенной из расчета крышкой

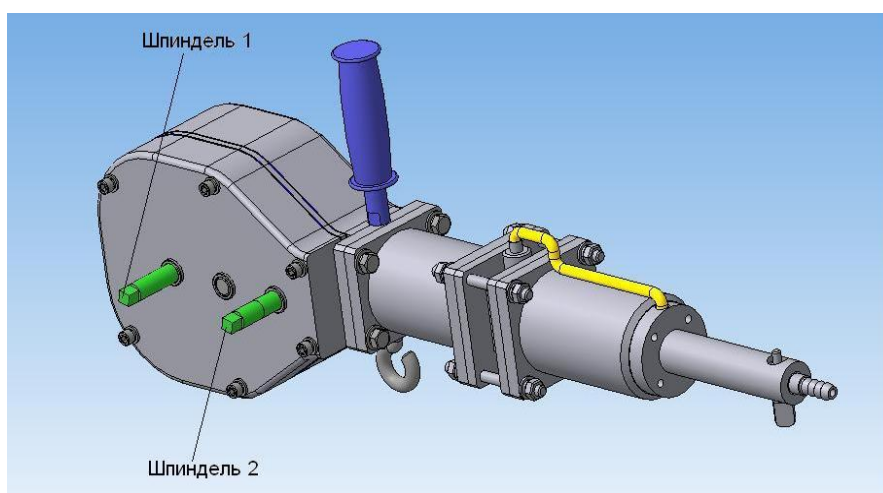


Рисунок 6 – Модель разработанного гайковерта

### Основные технические характеристики

Частота вращения выходных шпинделей –  $23,4 \text{ об/мин}^{-1}$ .

Максимальный момент затяжки –  $120 \text{ Н·м}$ , (для  $0,5 \text{ МПа}$ ).

Межцентровое расстояние шпинделей –  $98 \text{ мм}$ .

Габариты –  $600 \times 280 \times 156 \text{ мм}$ .

Масса –  $10,7 \text{ кг}$ .

Разработанная конструкция позволяет одновременно закручивать два болта или гайки, что сокращает продолжительность операции.

Применение кривошипов в качестве направляющих собачек позволяет повысить точность выдержки крутящего момента за счет уменьшения трения движущихся элементов.

В целом отсутствие холостого хода обеспечивает непрерывность вращения выходных шпинделей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ №2444430. Поршневой гайковерт / Ланищиков А.В. (RU), Моисеев В.Б. (RU), Волков В.В. (RU), Колганов Е.А. (RU), Савин А.Г.(RU). – Б.И.-7. Оpubл. 10.03.12 г.

2. Патент РФ №2444429. Поршневой гайковерт / Ланищиков А.В. (RU), Моисеев В.Б. (RU), Шаркевич К.С.(RU). – Б.И.-7. Оpubл. 10.03.12 г.

---

# ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ, ПРОЧНОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ

---

УДК 621-2.002.2

## ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РЕДУКТОРОВ ПРЯДИЛЬНЫХ МАШИН

© *А.В. Сергеичев, Пензенский государственный технологический университет*  
(г. Пенза, Россия)

© *А.С. Липин, Пензенский государственный технологический университет*  
(г. Пенза, Россия)

## INCREASE OF WEAR RESISTANCE OF GEARS OF REDUCERS SPINNING MACHINES

© *A.V. Sergeichev, Penza State Technological University*  
(Penza, Russia)

© *A.C. Lipin, Penza State Technological University*  
(Penza, Russia)

Установлены зависимости влияния износа и точности зубчатых колес на выходные параметры машин. Предложены методы повышения износостойкости зубчатых колес на этапах приработки и эксплуатации.

**Ключевые слова:** зубчатое колесо, износ, приработка, надёжность.

Shows the dependences of the effect of wear and precision gear wheel on the output parameters of the machines. Methods of improving the wear resistance of gear wheels at the stages of running-in, and exploitation.

**Key words:** gear wheel, wear, running-in, reliability.

**E-mail:** gpz24@mail.ru; alxlipin@mail.ru

Текстильная промышленность является одной из самых механизированных отраслей производства. Более половины ее основных фондов приходится на долю машин и аппаратов. Современные пневмопрядильные машины – сложные механические системы, которые должны обеспечить выпуск качественной продукции при высоких динамических нагрузках. В связи с этим к качеству изготовления текстильных машин, их основных узлов функционального назначения предъявляются повышенные требования.

**Цель работы** – установление параметров качества вырабатываемого продукта, на примере пневмопрядильных машин, от величины износа зубчатых колес и их степени точности.

**Постановка задачи.** В условиях, когда прекратила свою деятельность инфраструктура «НИИ, КБ – завод-изготовитель – предприятие-потребитель», но продолжается эксплуатация оборудования, имеющего сроки службы 15 лет и более, выпуск запасных деталей и отдельных механизмов типа редукторов не приостановлен. В этой связи настоятельной необходимостью является создание банков данных прогрессивных технологий и технологий, которые могут быть без капитальных затрат за короткое время реализованы в условиях эксплуата-



ции, направленных на повышение долговечности деталей трибосопряжений, узлов и механизмов приводов с редукторами, их основными быстроизнашиваемыми элементами во многих случаях являются зубчатые колеса.

Изнашивание в наибольшей степени определяет практическую долговечность зубчатых колес. Разнообразие видов износа и различие их физико-механической природы требуют дифференциального изучения и специальных методов предотвращения изнашивания.

В процессе эксплуатации могут произойти поломки зубьев и их износ. По Б.И. Костецкому, вид износа определяется процессом, который протекает с максимальной скоростью и становится преобладающим. Б.И. Костецкий делит все процессы разрушения на нормальные (теоретически неизбежные и практически допустимые) и патологические явления повреждаемости (не допустимые при работе машин).

Допустимые виды изнашивания:

- а) окислительный износ,
- б) износ плёнок не кислородного происхождения,
- в) абразивный износ без снятия стружки и без царапания.

Повреждения (недопустимые виды изнашивания):

- а) схватывание,
- б) абразивный износ со снятием стружки и царапанием,
- в) усталостное повреждение (питтинг),
- г) фреттинг процесс,
- д) смятие,
- е) коррозия,
- ж) кавитация.

Причинами возникновения этих повреждений являются: дефекты в материале; недостаточно точное изготовление зубчатой передачи и её сборки, неполное прилегание и перекосы; несоответствующее количество или качество смазки; чрезмерное повышение температуры, вызываемое несовершенством смазки или охлаждения, и, наконец, перегрузка.

Снизить интенсивность изнашивания зубчатых колес можно за счёт подбора оптимального режима приработки, в результате чего уменьшается вероятность появления питтинга, снижается интенсивность абразивного изнашивания и других форм повреждения. Но для достижения наилучших результатов необходимо дополнительно совмещать при изготовлении зубчатых колес конструктивные и технологические решения.

Основными способами снижения интенсивности изнашивания зубчатых колес являются высокая точность их изготовления, подбор износостойких материалов, применение методов инженерии поверхности зубьев, работа зубчатых передач в режиме жидкостного трения, увеличение коэффициента взаимного перекрытия (в прямозубых передачах) за счёт применения нестандартных профилей зуба с большим коэффициентом высоты головки.

В текстильных машинах имеет место применение редукторов оригинальной конструкции, при этом в период приработки отмечены случаи схватывания и заедания зубьев колес, что приводит редукторы в неработоспособное состояние. Поэтому актуальными являются исследования по совершенствованию технологии финишной обработки и приработки, формирующие эксплуатационные свойства поверхностей [1, 3] на стадии изготовления зубчатых колес и созданию условий их работы в режиме избирательного переноса, при котором происходит образование неокисляемой пленки из мягкого металла (меди) на рабочих поверхностях зубьев колес, сопровождающееся уменьшением коэффици-

ента трения до жидкостного и приводящее к значительному снижению износа. Результаты данных исследований могут быть использованы как в условиях завода-изготовителя, так и в эксплуатации и внести значительный вклад в существенное повышение надежности и её основных свойств безотказности и долговечности зубчатых передач.

В этих целях предлагается новая технология приработки и подготовки поверхностей зубчатых колес к эксплуатации. Данная технология заключается в применении медного покрытия с последующей термообработкой и использованием в качестве прирабочей среды металлоплакирующего (МП) масла серии И-Т-С-32 (мп); -68 (мп); -100 (мп); -150 (мп); -220 (мп) ТУ 38.401127–92 совместной разработки Пензенского государственного университета и Средневолжского научно-исследовательского института нефтяной промышленности (ОАО «Св НИИ НП») [2]. Эти масла легко изготовить в условиях предприятия при использовании маслорастворимых присадок (например, примененное МП масло И-Т-С-68 (мп) ТУ 38.401127–92, состав которого – базовое масло И-Т-С-68 (ИГП-49), присадки ДФ-11 (1,2 %) и МКФ-18 (0,6 %) – компоненты присадки «Трибокор» – ТУ 38.40187–88).

Медное покрытие предложено осуществлять химическим способом, как наименее трудоемким и экономически выгодным для деталей сложной формы. При термообработке, благодаря медному покрытию, тепло равномерно отводится по всей поверхности, при этом обеспечивается заданная точность зубчатых колес. Рабочая поверхность защищается от образования окалины, выгорания углерода и легирующих элементов, сохраняется первоначальная шероховатость рабочей поверхности зубьев под покрытием, снимаются остаточные напряжения в плёнке покрытия с основным металлом. Медное покрытие, а также металлоплакирующее масло обеспечивают реализацию избирательного переноса с минимальным расходом медьсодержащих присадок.

**Результаты исследований.** Интенсивный износ зубчатых колес оказывает влияние на выходные параметры – качество пряжи, вырабатываемой пневмопрядильными машинами (рис. 1).

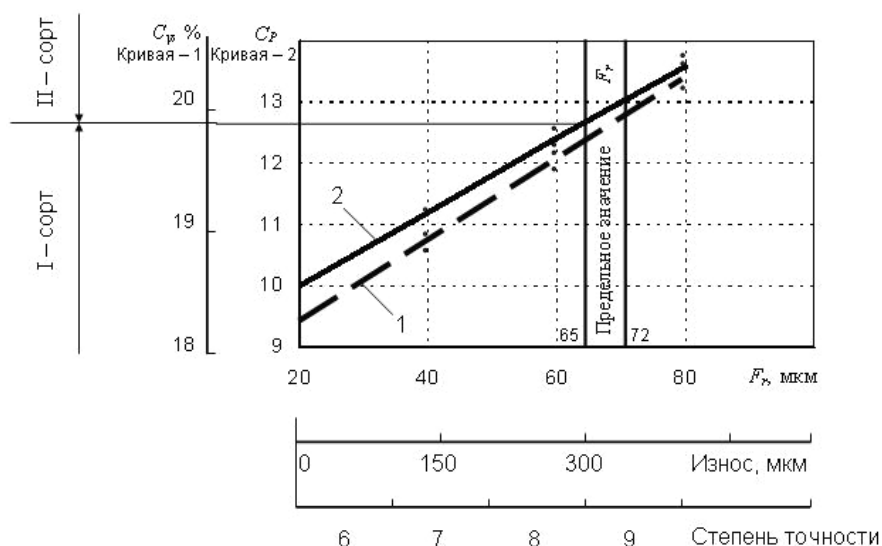


Рисунок 1 – Зависимость неравнотности пряжи по толщине и разрывной нагрузке ( $C_v$  и  $C_r$ ) от радиального биения зубчатых колес ( $F_r$ ), соответствующего их износа и степени точности

Сравнительные результаты испытаний показывают, что увеличение износа способствует росту радиального биения и переводит зубчатые колеса в более низкую степень точности. Предельная величина радиального биения зубчатых колес  $F_r = 65...72$  мкм, за пределами которой происходит снижение качества пряжи и повышение обрывности (см. рис. 1).

**Выводы.** Наблюдения за работой пневмопрядильных машин на ряде текстильных предприятий показали, что количество отказов зубчатых передач приводов составляет 16...18 % от отказов остальных групп элементов машины. Однако простои по причине неисправности редукторов в среднем составляют 48 % и в отдельных случаях достигают 74 %. В результате применения разработанной технологии приработки снижаются на 18 % отказы зубчатых колес, подверженных молекулярно-механическому изнашиванию. Повышается долговечность зубчатых колес за счет снижения их износа и тем самым сохранения более высокой точности зубчатых колес и, следовательно, качества вырабатываемого продукта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергеев А.В., Денисова Н.Е. Приработка сложных технических систем с позиций надёжности и изнашивания // Трение и износ. – 2004(25). – № 1. – С. 22–28.

Справочник. Смазка оборудования текстильной и легкой промышленности / Под ред. Н.Е. Денисовой. – М.: Легпромбытиздат, 1994. – 448 с.

Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

УДК 681.5

#### ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В СИЛОВОМ БЛОКЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© М.В. Черкунов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

#### RESEARCHING CONTACT DEFORMATIONS IN THE POWER BLOCK OF THE TESTING DEVICE FOR BOLTED JOINTS

© M.V. Cherkunov, Penza State Technological University (Penza, Russia)

В статье проведены исследования контактных деформаций при затяжке (стягивании элементов) гайки в силовом блоке устройства для испытаний резьбовых соединений.

**Ключевые слова:** резьбовые соединения, контактные деформации, сила.

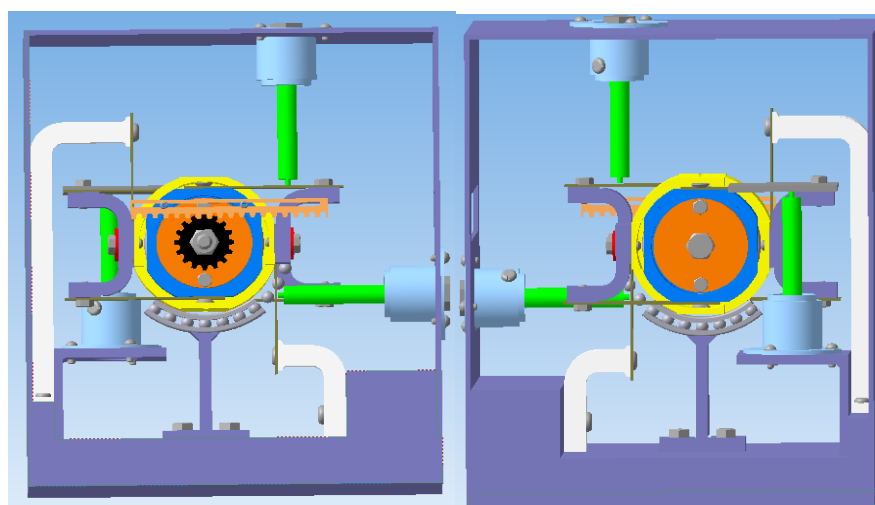
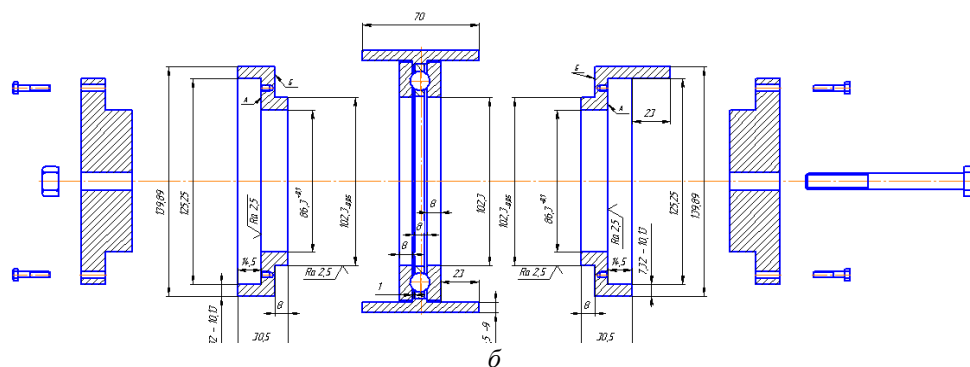
In the article the author researches of contact deformations are conducted at an inhaling (tightening of elements) nuts in the power block of the device for tests of bolted connections.

**Key words:** screw joints, contact deformations, force.

**E-mail:** tcherkunoff@yandex.ru

Сборка является завершающим этапом производственного процесса и во многом определяет качество изготавливаемой продукции.

В машиностроении резьбовые соединения (далее РС) занимают значительную долю от общего количества соединений: 25–35 %. Анализ патентно-технической литературы показал, что существует проблема обеспечения качества автоматизированной сборки резьб [1].

 $q$ 

6

Рисунок 1 – а) 3D-модель силового блока устройства,  
б) конструктивные особенности силового блока устройства

Силовой блок (блок разделения прикладываемого крутящего момента) варианта устройства для испытаний РС показан на рис. 1,а. Здесь нахождение оптимальной величины затяжки конкретного резьбового узла возможно на стадии проектирования РС. В данной конструкции изгиб упругих элементов фиксируется с помощью измерительного блока, работающего по дифференциальной схеме измерений манометрического типа [4].

Изделие может быть использовано в различных отраслях промышленности для исследования характеристик РС и настройки небольших динамометрических ключей.

При затяжке в узле разделения крутящего момента происходят контактные деформации, величина которых не должна превышать определённого значения (2 мкм) [2]. Целью изучения является определение допустимых пределов применения устройства по критерию контактных деформаций.

Для определения границ зон контактов и величины деформаций исследования часто проводятся в программах конечно-элементного анализа [5, 6].

В рассматриваемом узле контакт происходит по поверхностям А и Б (рис. 1,б).

Расчёт деформаций проводился в модуле АПИМ программного комплекса КОМПАС 14 [7] в силу простоты работы и достаточной для расчетов точности.

Принимаем исключение перемещения по всем трём осям. Прикладываем двустороннюю силу к поверхности гайки и шляпке болта М6, имитируя затянутое соединение болт-гайка (рис. 2,а). Принимаем общее температурное воздействие, величиной в 25 °С (рис. 2,б).

Далее производим построение конечно-элементной сетки:

Настраиваем параметры расчёта I и проводим его (рис. 2,в).

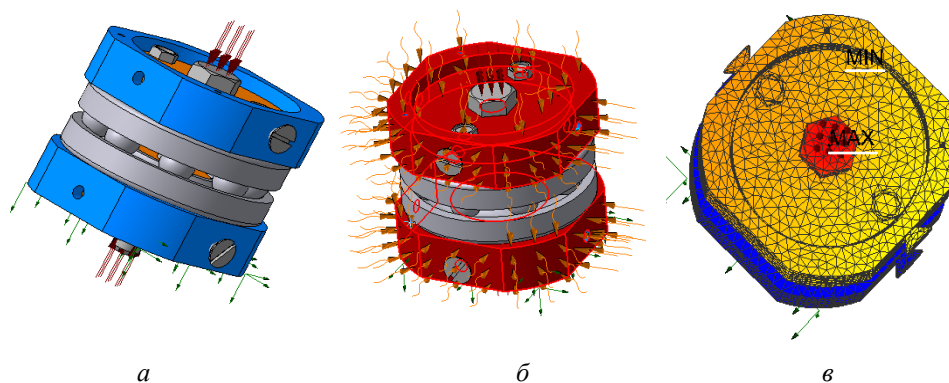


Рисунок 2 – а) приложение силы (имитация затянутого соединения), б) учёт влияния температуры, в) полученные данные

Результат: при приложении силы менее 420 ньютон (двусторонняя) деформация поверхности под шляпкой болта менее 2 мкм (условие обеспечения точности измерений).

Также можно увидеть распределение напряжений в конструкции. Расчёт выполнен для материала Сталь 45 для всей сборки.

## Расчёт II

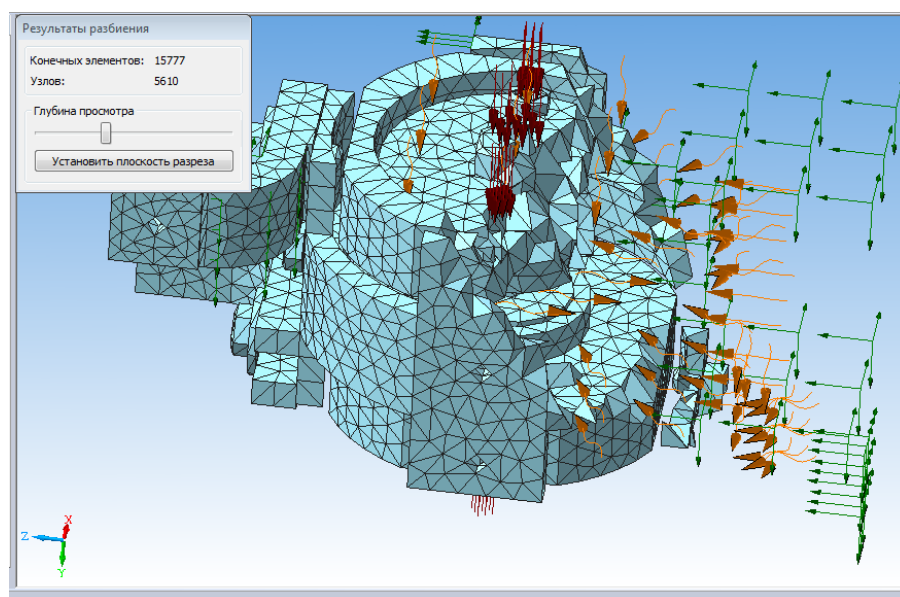
1. Проведём исследование более полной сборки. Устанавливаем закрепление поверхностей кронштейна, т.к. эти тела – несущие в конструкции.

Задаём усилие в 1000 Н с обеих сторон. Материал Сталь 45.

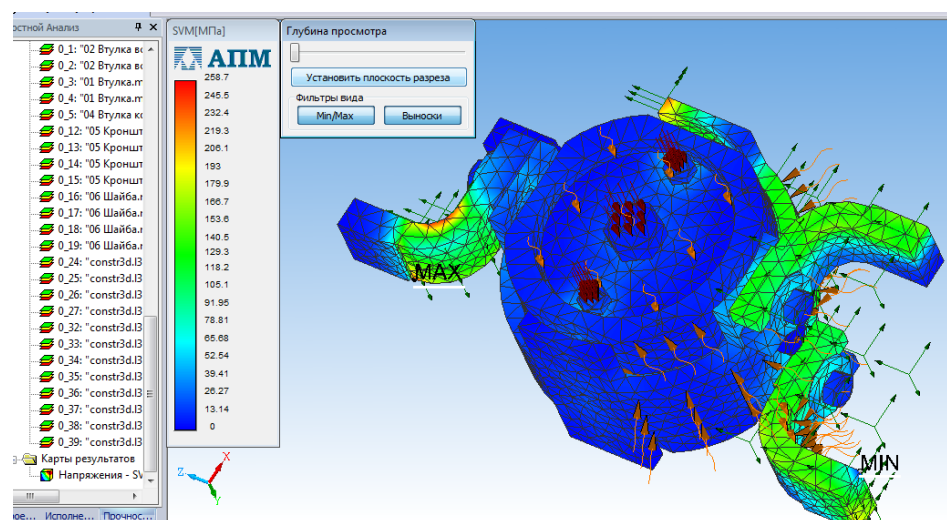
2. Строим сетку, выставляя коэффициент разрежения в объёме 1 – для сохранения однородной структуры конечных элементов [7].

Устанавливаем плоскость разреза, чтобы было видно изменение внутренней структуры (рис. 3,а), полученная карта напряжений показана на рис. 3,б.

Производим расчёт.



а



б

Рисунок 3 – а) структура элементов, б) карта напряжений

Коэффициент запаса конструкции в различных областях показан на рис. 4,а. Слева шкала – идентификатор значения по цвету.

В этом случае деформации малы, их значения не превышают предельно допустимого.

Задавая различную нагрузку, выяснили, что менее 2 мкм контактные деформации происходят при усилии менее 1110 Н.

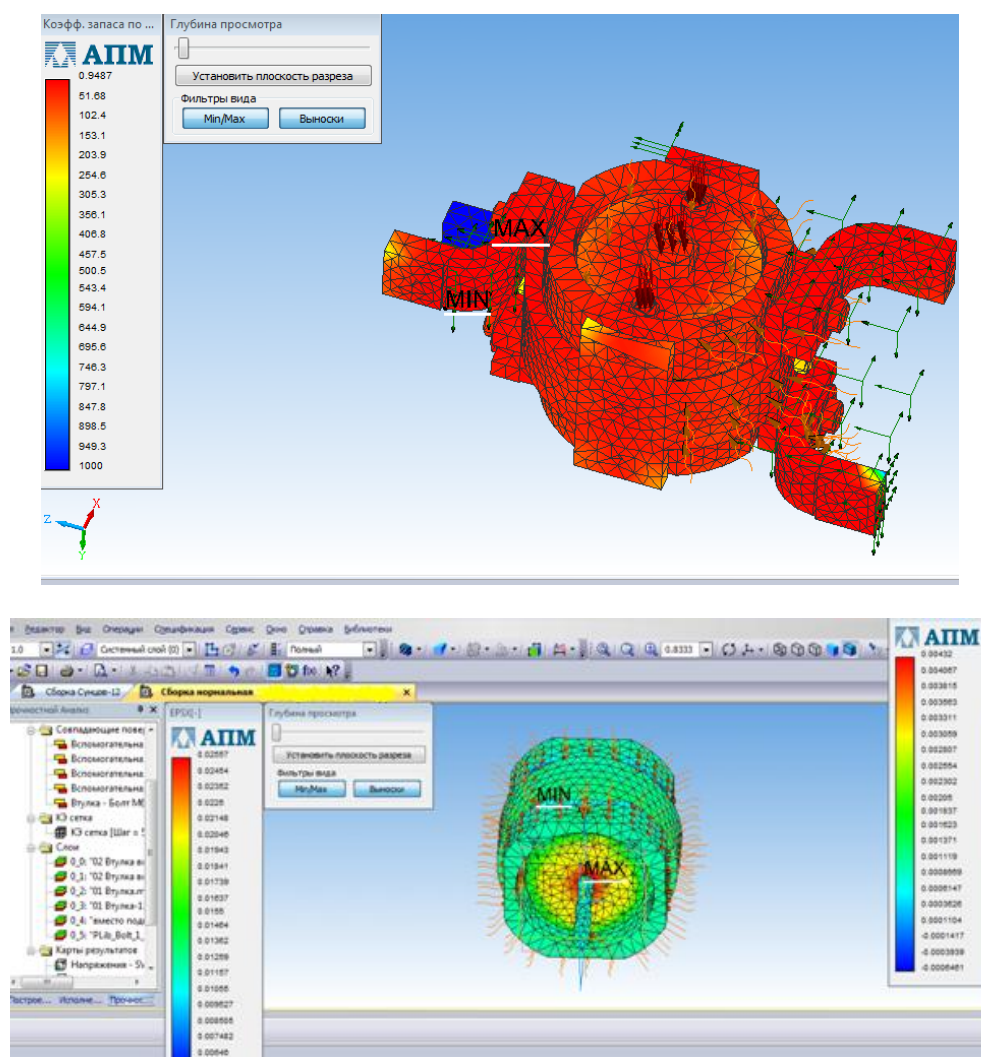


Рисунок 4 – а) коэффициент запаса конструкции в различных областях, б) карта деформаций

Далее рассмотрим критичный вариант нагрузки и теплового воздействия. Зададим распределённую силу  $500 \text{ Н/мм}^2$  [2] на поверхность шляпки болта. Установим температуру для всех поверхностей в 40 градусов Цельсия. Материал – Сталь 45. Получим карту деформаций (рис. 4,б).

Аналогично были произведены расчёты для распределённой силы 600, 700, 800, 900 и  $1000 \text{ Н/мм}^2$ .

Деформации поверхности, на которую давит гайка, аналогичной поверхности, на которую давит шляпка болта,  $\approx$  от 0,09 до 0,17 мм.

Таким образом, проведены исследования контактных деформаций в силовом блоке устройства. Найдены максимально допустимые нагрузки, в пределах которых обеспечивается точность измерений по критерию максимальной величины контактных смятий.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании устройств испытаний РС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ланичиков А.В. Обеспечение качества операций сборки резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 11. – С. 47–48.
2. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М. : Машиностроение, 1990. – 368 с. : ил.
3. Ланичиков А.В., Моисеев В.Б. Технология и оборудование автоматизированной сборки резьбовых соединений : Монография. – Пенза : ПГУ, 1999. – 260 с.
4. Патент РФ № 2199099, МПК-7 G 01 L 3/14, G 01 L 5/24 Способ контроля крутящего момента и пневматическое устройство для его реализации // Ланичиков А.В., Моисеев В.Б., Трилисский В.О., Федин С.В. – Оpubл. 20.02.03 г., Бюл. 5.
5. Зотов Е.В. Совершенствование центробежной объёмной обработки деталей гранулированными рабочими средами путём интенсификации движения рабочей загрузки : Дисс. ...канд. техн. наук. – Пенза, 2012.
6. Мишин А.В. Конечно-элементная методика расчёта динамически нагруженных подшипников скольжения с учётом отклонений формы рабочей поверхности от цилиндрической // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 2. – С. 43–54.
7. ascon.ru

УДК 621.81:539.4 + 621-2.002.2

### ПРИРАБОТКА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ МАШИН ПО ВЕЛИЧИНЕ ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ И ИЗНАШИВАНИЯ

- © А.В. Сергеичев, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)
- © А.С. Липин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

### RUNNING-IN MACHINES WITH A LARGE NUMBER OF ELEMENTS BY VALUES OF PARAMETERS OF RELIABILITY AND WEAR

- © A.V. Sergeichev, Penza State Technological University (Penza, Russia)
- © A.C. Lipin, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Рассмотрена приработка с позиций надёжности и изнашивания при изменении параметров поверхностных слоев деталей. По результатам статистических исследований с позиции надёжности определено время приработки в графической и аналитической формах.

**Ключевые слова:** зубчатое колесо, износ, приработка, надёжность.

Considered running-in terms of reliability and wear, as a result of the changing parameters of the surface layers of the parts. According to the results of statistical research from the point of view of reliability determined time running-in graphical and analytical forms.

**Key words:** gear wheel, wear, running-in, reliability.

**E-mail:** gpz24@mail.ru; alxlipin@mail.ru

Состояние поверхностей деталей машин, формируемых в процессе эксплуатации, значительно отличается от качества поверхностей, полученных после изготовления. Оно различается по геометрическим характеристикам, по структуре и свойствам поверхностных слоев и их напряженному состоянию. В начальный период работы трибосопряжений (ТС) происходит их приработка:



трансформация исходного состояния поверхностных слоёв и переход их в эксплуатационное состояние.

Период приработки характеризуется периодом начального изнашивания. Одной из важных задач в проблеме повышения износостойкости является обеспечение наиболее быстрого перехода к эксплуатационному состоянию поверхностей. Данная задача может решаться конструкторскими, технологическими и эксплуатационными методами инженерии поверхностей [1].

К мероприятиям первого направления можно отнести: выбор материалов и покрытий пар трения; создание условий сохранения жидкостной смазки; выбор геометрической формы деталей и способов обработки, обеспечивающих желательную механику контакта, поддержание оптимальных температурных режимов и т.д.

К технологическому направлению относятся следующие мероприятия: повышение точности изготовления и сборки ТС, применение совершенных способов формирования поверхностей трения: модификация и нанесение покрытий.

Третье направление, при котором для интенсификации процессов приработки производится выбор оптимальных и рациональных скоростных, нагрузочных и температурных режимов во время окончания приработки в период эксплуатации.

Приработка поверхностей – длительный технологический процесс. Согласно данным [3] и других учёных, приработка большинства трибосопряжений автомобилей заканчивается не менее чем через 30–40 ч., а тяжело нагруженные трибосопряжения (например, детали силовых передач) – через 60–100 ч. Прядильные, крутильные, ровничные машины многосекционные и имеют длину до 15 м, поэтому они проходят приработку в полном объёме в условиях эксплуатации, во время которой соблюдаются особые, часто щадящие динамические режимы. Для данных машин определить время приработки наиболее целесообразно по параметру потока отказов (ППО). В процессе сборки таких машин в условиях завода-изготовителя проводится только кратковременная обкатка механизмов (редуктора, коробки передач) в целях контроля отдельных выходных параметров машин после завершения сборки. Такая оценка проводится, как правило, субъективно. Поэтому время приработки отдельных механизмов оценивается в комплексе с приработкой всей машины.

Оригинальные редукторы проходят приработку в режиме обкатки на стендах, выполненных по открытому потоку мощности. При этом режимы (время, нагрузка и др.) очень различны даже для сходных изделий, но выпускаемых различными предприятиями.

Длительность и режимы приработки не являются, как правило, научно обоснованными и устанавливаются на предприятиях «опытным» путём или из конъюнктурных соображений, так, например, длительность периода приработки кольцепрядильных машин, согласно НТД, составляет 1500 ч. [4, 5].

**Цель работы** – построение статистической модели приработки с позиций надёжности по ППО. По результатам исследований определить целесообразную длительность приработки аналитическим и графическим методами с использованием теории вероятности и математической статистики.

**Постановка задачи.** Исходя из физики процесса разрушения, приработку можно рассматривать с точек зрения надёжности и изнашивания.

С точки зрения надёжности под приработкой понимают возможный начальный период наработки технической системы, в течение которого имеет место устойчивая тенденция к уменьшению параметра потока отказов  $(\omega(t))$  (в

том числе и не участвующих в трении), что обусловлено постепенным выявлением и устранением скрытых дефектов.

Приработка с точки зрения изнашивания – процесс изменения шероховатости и волнистости поверхностей трения и физико-механических свойств поверхностных слоёв материала деталей трибосопряжений в начальный период трения, обычно проявляющихся при постоянных внешних условиях в уменьшении работы трения и интенсивности изнашивания.

Графически надежность и изнашивание можно описать сходными зависимостями в стилизованном виде за весь срок службы изделий: через  $\omega(t)$  и  $I_h(t)$  (рис. 1). Изучая эти зависимости, выделим три стадии работы машины: первая стадия (участок I) продолжительность, которой невелика по сравнению с ожидаемой долговечностью изделия. Эта стадия характеризуется нестационарным состоянием ТС и высокими значениями  $\omega$  и  $I_h$ , постепенно убывающими во время приработки ( $t_{пр}$ ) ТС, т.е. перехода в стационарное состояние.

Наступает вторая стадия (участок II) с наибольшей продолжительностью, часто равной физическому сроку службы машины. Она характеризуется установившимися значениями  $\omega_0 = \text{const}$  и  $I_{h0} = \text{const}$ . Эта временная стадия ( $t_{нз}$ ) относится к нормальной эксплуатации ТС механизма после завершения приработки. В ходе её реализации износ равномерно накапливается, приводя к повреждению поверхности, изменению формы и зазора деталей ТС, что в конечном итоге приводит к значительному изменению условий работы;  $\omega$  и  $I_h$  резко возрастают, и наступает этап катастрофического износа (участок III) и катастрофических отказов.

С точки зрения изнашивания процесс приработки делят на периоды микро- и макрогеометрической приработки и формирование эксплуатационных характеристик поверхности.

В первый период происходит приработка на микрогеометрическом уровне, т.е. интенсивное изнашивание деталей за счет сглаживания и срезания микронеровностей на контактирующих поверхностях, происходит увеличение начального зазора в сопряжении. Продолжительность этого периода для различных пар трения не превышает 1–5 ч.

В течение второго периода интенсивность изнашивания снижается, поверхности деталей упрочняются, уменьшаются потери на трение в ТС. Одновременно устраняются отклонения от геометрической формы деталей, возникшие в процессе производства. Продолжительность этого периода составляет 20–30 ч.

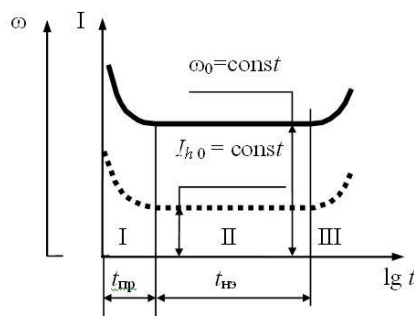


Рисунок 1 – Зависимости  $\omega$  (—) и  $I_h$  (----) от времени  $t$

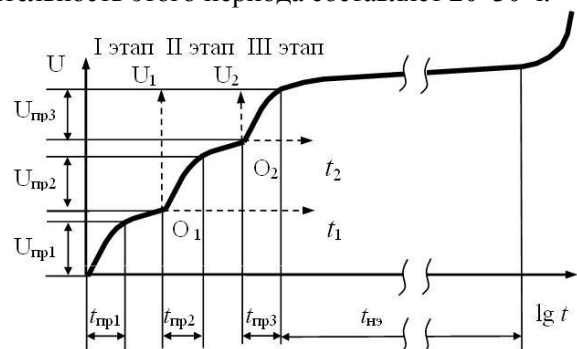


Рисунок 2 – Зависимость износа  $U$  от времени  $t$  при ступенчатом нагружении

Третий, завершающий, период характеризуется стабилизацией интенсивности изнашивания, потерь на трение, температуры, расхода масла и других выходных параметров работы машины. Продолжительность этого периода 50–60 ч. [5].

Для сокращения времени приработки многие авторы [2] рекомендуют ступенчатый режим нагружения. При каждой ступени приработки вследствие изменения нагрузки и скорости скольжения происходит образование новой поверхности со своей микроструктурой (рис. 2).

Стилизованная кривая на рис. 2 характерна как для периода ступенчатого нагружения, так и для преждевременной разборки (ремонта) трибосопряжений, в том числе и зубчатых передач (ЗП) (например, в точках  $O_1$  или  $O_2$ ) приводящей после сборки узла опять к появлению периода П, который, как видно из графика, характеризуется повышенной интенсивностью износа.

В общем случае ППО аппроксимируется функцией  $\omega(t)$  [7] вида

$$\omega(t) = \omega_1 \cdot e^{-\alpha t} + \omega_0,$$

где  $\omega_1$  – это ППО, обусловленный механическими дефектами изготовления и сборки изделий;  $\alpha$  – положительная величина, характеризующая скорость протекания процессов приработки,  $\omega_0$  – установившееся значение ППО, характерное для периода нормальной эксплуатации ( $t_{нз}$ ) (рис. 1).

Слагаемое  $\omega_1 \cdot e^{-\alpha t}$  стремится к нулю при  $t$ , стремящемся к бесконечности. Период приработки считается законченным при достижении  $\omega_0 = \text{const}$  (рис. 1).

**Результаты исследований.** Построение функции ППО было осуществлено по данным эксплуатационной статистики на пневмопрядильные машины ППМ-120А1М (функция  $\omega_{пп}(t)$ ) и кольцепрядильные машины П-66-5МЗ (функция  $\omega_{кп}(t)$ ). В процессе наблюдений за их работой фиксируются все простои и причины, их вызвавшие, время безотказной работы машины между последовательными отказами, а также время восстановления каждого отказа.

Для сокращения времени наблюдений принята методика ускоренных испытаний, основанная на принципе увеличения количества подконтрольных машин от 5 до 50. В результате аппроксимации экспериментальных данных получены следующие аналитические функции:

$$\begin{aligned}\omega_{пп}(t) &= 0,13136 \cdot e^{(-0,05652t)} + 0,00119, \\ \omega_{кп}(t) &= 0,08054 \cdot e^{(-0,0084t)} + 0,0475.\end{aligned}\quad (1)$$

После модернизации машин, устранения ряда конструктивных, технологических недоработок и других упущений эти функции примут вид:

$$\begin{aligned}\omega_{пп}^M(t) &= 0,1297 \cdot e^{(-0,05804t)} + 0,000158, \\ \omega_{кп}^M(t) &= 0,03156 \cdot e^{(-0,0093t)} + 0,0334.\end{aligned}\quad (2)$$

Графики функций приведены на рис. 3.

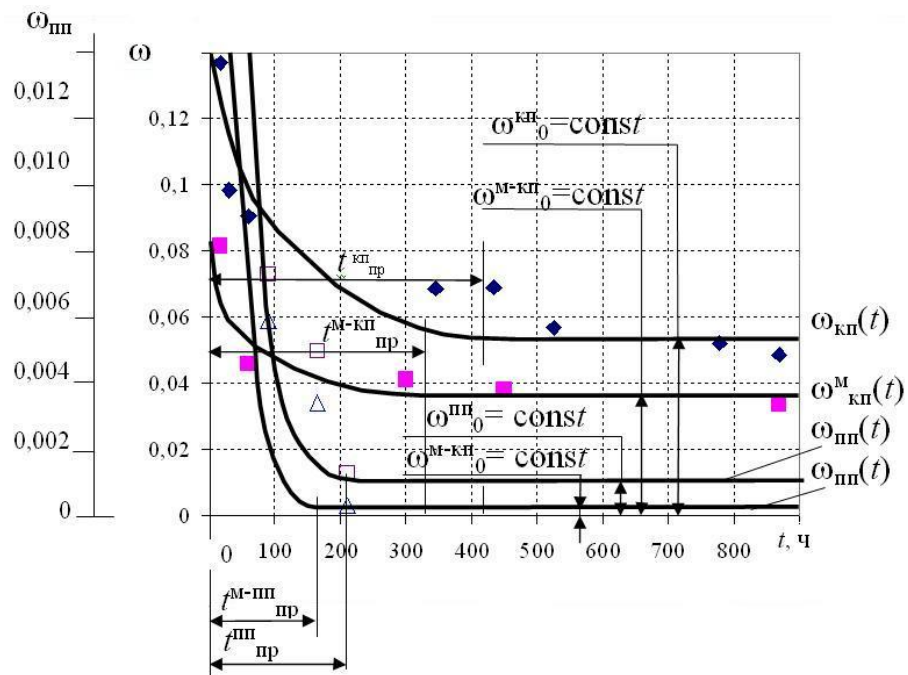


Рисунок 3 – Изменение величины потока отказов ( $\omega$ ) во время работы ( $t$ )

Время приработки можно определить графически по рис. 3 или рассчитать аналитически по формуле

$$t_{\text{пр}} = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left( \frac{\alpha}{\omega_1} \cdot \left[ \frac{\omega_0 \cdot t_3 + \ln P(t_3)}{e^{(-\alpha \cdot t_3)} - 1} \right] \right).$$

Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика прядильных машин

| Машина | Параметр потока отказов |              | Время приработки ( $t_{\text{пр}}$ ), ч |                 |                    |
|--------|-------------------------|--------------|-----------------------------------------|-----------------|--------------------|
|        | $\omega_0$              | $\omega_0^M$ | до проведения исследований              | до модернизации | после модернизации |
| пп     | 0,00119                 | 0,000158     |                                         | 220             | 180                |
| кп     | 0,0435                  | 0,0334       | 1500                                    | 440             | 310                |

**Выводы.** Анализ функций (1), (2) и рис. 3 показывает, что установившееся значение ППО для машин ППМ-120А1М намного ниже по сравнению с машинами П-66-5МЗ, что говорит о более высоком уровне конструкторских и технологических решений при изготовлении машины ППМ-120А1М. По кривым ППО можно определить время приработки и уровень надежности машин, характеризующееся установившимся значением ППО  $\omega_0 = \text{const}$ .

Выше отмечалось, что существующие технологии приработки недостаточно эффективны на машиностроительных и ремонтных предприятиях. Вследствие чего большая доля износа и повреждений контактных поверхностей ЗК приходится на период приработки. Появилась необходимость инженерии поверхностей на основе совершенствования технологий приработки ЗП технологическими и триботехнологическими методами. Наилучших результатов можно добиться комплексным методом: применение различных режимов нагружения, методов получения поверхности: модификация, нанесение покрытий на прирабатываемые поверхности и использование металлоплакирующих масел с паке-

том присадок (например [6], МКФ-18, ДФ-11 и др.) с целью реализации при эластогидродинамическом трении эффекта избирательного переноса, осуществление которого приведёт к минимизации изнашивания и потерь на трение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.*
2. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М. : Машиностроение, 1977. – 528 с.*
3. *Маслов Н.Н. Эффективность и качество ремонта автомобилей. – М. : Транспорт, 1981. – 304 с.*
4. *Машина кольцепрядильная марки П-76-5М4. Руководство по эксплуатации. – 1975.*
5. *Радин Ю.А., Суслов П.Г. Безызносность деталей машин при трении. – М. : Наука; Ленингр. отд-ние, 1989. – 229 с.*
6. *Смазка оборудования текстильной и легкой промышленности : Справочник / Под ред. Н.Е. Денисовой. – М. : Легпромбытиздат, 1994. – 448 с.*
7. *Чихос Х. Системный анализ в триботехнике. – М. : Мир, 1982. – 352 с.*

УДК 621.3.049.77:539.3

### МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕХАТРОНИКИ

© **В.Ю. Зайцев**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

### MODELS OF THE IS INTENSE-DEFORMED STATUS OF MECHATRONIC UNITS

© **V.J. Zajtsev**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

Рассматриваются двухслойная и трехслойная модели напряженно-деформированного состояния изделий мехатроники, построенные на основе задачи Ламе. Полученные модели позволяют оценить напряжения и перемещения во внутреннем объеме изделий мехатроники под воздействием различных механических нагрузок и выбрать оптимальное конструкторско-технологическое исполнение корпуса мехатронной системы, обеспечивающего работоспособность внутренних компонентов.

**Ключевые слова:** модель, модели напряженно-деформированного состояния, изделия мехатроники, механические нагрузки.

Two-layer and three-layer models of the is intense-deformed status of mechatronic units, constructed on the basis of a problem to the Lamé are considered. The received models allow to estimate pressure and moving to internal volume of mechatronic units under the influence of various mechanical loadings and to choose optimum design-technological case execution the mechatronic systems, providing working capacity of internal components.

**Key words:** a model, models of the is intense-deformed status, mechatronic units, mechanic loads is intense.

**E-mail:** vluzai@gmail.com

Как показывают опыт эксплуатации и проведенные исследования, основными факторами, определяющими долговечность изделий мехатроники, являются: внешние механические нагрузки; нагрузки, связанные с совершением

рабочего цикла; воздействие рабочей и окружающей среды; длительная эксплуатация и хранение.

Исследования отказов изделий мехатроники показывают, с одной стороны, что 92 % отказов изделий происходят вследствие механических и тепловых воздействий при эксплуатации и 8 % вследствие воздействия на компоненты изделий агрессивных газовых и жидких сред [2–4].

Традиционно применяемыми при производстве мехатронных изделий монтажно-сборочными технологиями являются технологии пайки, сварки, склеивания, свинчивания, заформовки, зачеканки, заливки, намотки, обволакивания, лакировки, окраски, герметизации [2–4].

Большинство отказов происходит в местах контактирования двух и более различных сред или в непосредственной близости к зоне контактирования, т.е. в местах концентрации напряжения. Для электронных компонентов: проводник – диэлектрик, элемент – заливка, проводник – заливка и т.д.

Электронные компоненты мехатронных устройств имеют весьма строго регламентированные и обоснованные предельные нагрузки по большинству характеристик и внешних воздействий. Сложнее обстоит дело с обеспечением этих характеристик в составе конструкций изделий, представляющих собой сильно гетерогенные диссипативные структуры [2–4]. Поэтому моделирование напряженно-деформированного состояния изделий мехатроники представляет значительный интерес с точки зрения обеспечения работоспособности.

Для оценки напряжений в общем случае рассмотрим цилиндр с внутренним радиусом  $b$  и внешним радиусом  $c$  (рис. 1). Будем полагать, что цилиндр нагружен одновременно и внутренним ( $P_a$ ) и внешним ( $P_b$ ) давлениями. В дальнейшем, принимая  $P_b = 0$  либо  $P_a = 0$ , можно будет проанализировать случай действия только внутреннего или только внешнего давления. При расчётах будем полагать, что  $\sigma_z = 0$ .

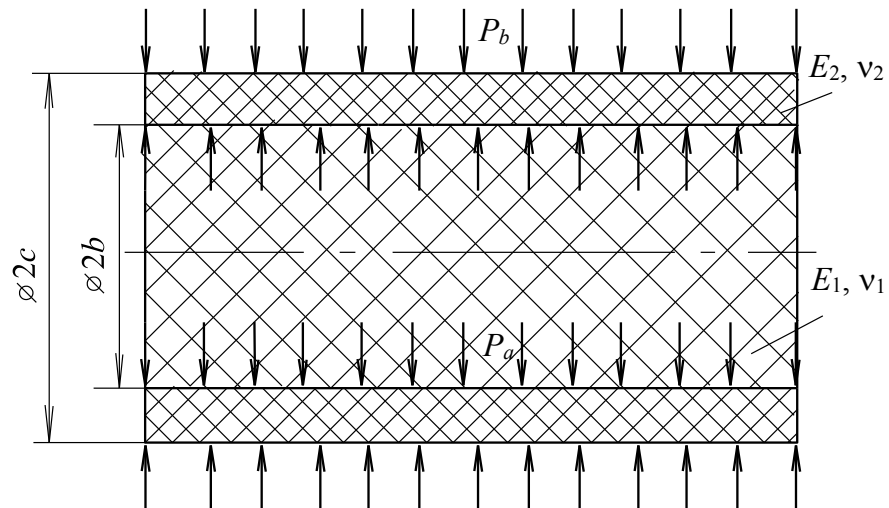


Рисунок 1 – Расчетная схема двухслойного корпуса

Задача определения напряжений и перемещений в толстостенном цилиндре носит название задачи Ламе, которая сводится к следующим уравнениям [1]:

$$\sigma_{r/z} = C_1 \pm \frac{C_2}{r^2}, \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – произвольные постоянные,  $r$  – текущий радиус;

$$U = \frac{1}{E} \left[ C_1(1-\nu)r + C_2(1+\nu)\frac{1}{r} - \nu\sigma_z r \right], \quad (2)$$

где  $E$  и  $\nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона, соответственно. Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  определяем из следующих граничных условий: при  $r=b$   $\sigma_r = -P_a$ , при  $r=c$   $\sigma_r = -P_b$ , т.о.

$$C_1 - \frac{C_2}{a^2} = -P_a, \quad C_1 - \frac{C_2}{b^2} = -P_b, \quad \text{откуда}$$

$$C_1 = \frac{P_a a^2 - P_b b^2}{b^2 - a^2}, \quad C_2 = \frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} (P_a - P_b).$$

В результате вместо (1) и (2) получим

$$\sigma_r = \frac{P_a a^2 - P_b b^2}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2}{r} \frac{P_a - P_b}{b^2 - a^2}, \quad (3)$$

$$U = \frac{1-\nu}{E} \frac{P_a a^2 - P_b b^2}{b^2 - a^2} r + \frac{1+\nu}{E} \frac{a^2 b^2}{r} \frac{P_a - P_b}{b^2 - a^2}. \quad (4)$$

Так как корпуса мехатронных изделий конструктивно выполняются из нескольких цилиндров, то для оценки напряжений следует рассмотреть следующие частные случаи:

- корпус представляет собой двухслойный цилиндр,
- корпус представляет собой трёхслойный составной цилиндр.

Рассмотрим первый частный случай.

Допущение. Статическая нагрузка является осесимметричной и вдоль оси цилиндра не меняется.

Расчётная схема представлена на рис. 1.

Для определения напряжений, возникающих в цилиндре, разобьём его на составные части.

Допущение. Посадочные напряжения между цилиндрами отсутствуют.

Под действием статической эквивалентной нагрузки на границе соприкосновения цилиндров возникает контактное давление  $P_k$ .

Запишем граничные условия:

$$\text{при } r=b \quad \sigma_{r_1} = \sigma_{t_1} = -P_k,$$

$$\text{при } r=c \quad \sigma_{r_2} = -P_b.$$

Условие сопряжение цилиндров:

$$\text{при } r=b \quad U_1 = U_2.$$

Используя формулу (4) и граничные условия, а также учитывая, что  $P_a = 0$ ,  $P_b = P$ , для первого цилиндра запишем выражение перемещений

$$U_1 = -\frac{1-\nu_1}{E_1} P_k r, \quad (5)$$

где  $E_1$ ,  $\nu_1$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала первого цилиндра.

Аналогично запишем выражение перемещений для второго цилиндра

$$U_2 = -\frac{1-\nu_2}{E_2} \frac{P_k b^2 - P c^2}{c^2 - b^2} r + \frac{1+\nu_2}{E_2} \frac{b^2 c^2}{r} \frac{P_k - P}{c^2 - b^2}, \quad (6)$$

где  $E_2$  и  $\nu_2$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала второго цилиндра.

Из условия сопряжения определим контактное давление, приравняв (5) и (6),

$$-\frac{1-\nu_1}{E_1} P_k b = \frac{1-\nu_2}{E_2} \frac{P_k b^2 - P c^2}{c^2 - b^2} b + \frac{1+\nu_2}{E_2} \frac{b^2 c^2}{b} \frac{P_k - P}{c^2 - b^2}.$$

Обозначив через:

$$A = \frac{1-\nu_1}{E_1} b, \quad B = \frac{1-\nu_2}{E_2} b, \quad C = c^2 - b^2, \quad D = \frac{1+\nu_2}{E_2} b c^2,$$

получим выражение для контактного давления в виде

$$P_k = \frac{B \cdot P \cdot c^2 + D \cdot P}{A \cdot C + D + B \cdot b^2}.$$

Определим напряжения, возникающие в цилиндрах.

Для первого цилиндра  $\sigma_r = \sigma_t$ .

Для определения напряжений, возникающих во втором цилиндре, воспользуемся формулой (3) и, подставив реальные значения радиусов, получим

$$\sigma_r = \frac{P_k b^2 - P c^2}{c^2 - b^2} - \frac{b^2 c^2}{r^2} \frac{P_k - P}{c^2 - b^2}, \quad \sigma_t = \frac{P_k b^2 - P c^2}{c^2 - b^2} + \frac{b^2 c^2}{r^2} \frac{P_k - P}{c^2 - b^2}.$$

Рассмотрим второй частный случай.

Допущения:

1. Статическая нагрузка является осесимметричной и вдоль оси цилиндра не меняется.
2. Посадочные напряжения между цилиндрами отсутствуют.

Расчетная схема представлена на рис. 2.

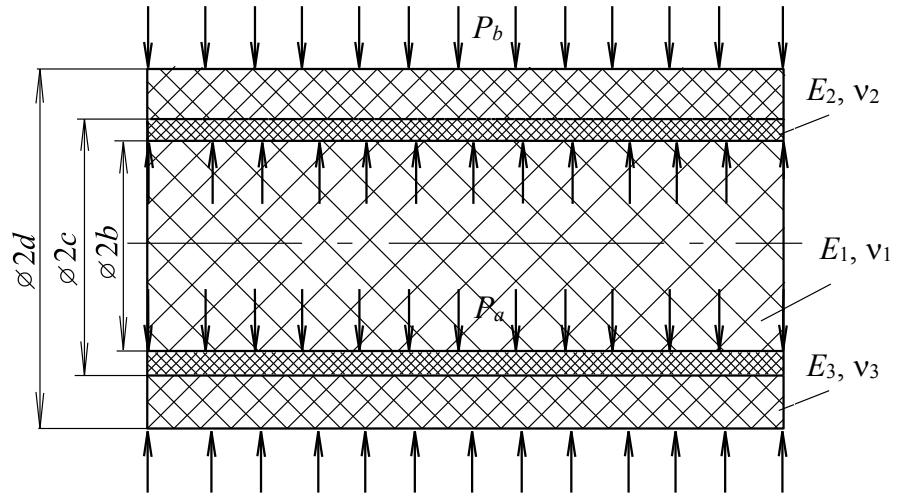


Рисунок 2 – Расчетная схема составного трехслойного цилиндра

Для определения напряжений, возникающих в цилиндре, разобьём его на составные части.

Под действием эквивалентной статической нагрузки на границах соприкосновения цилиндров возникают контактные давления  $P_{k1}$ ,  $P_{k2}$ .

Запишем граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } r = b \quad \sigma_{r1} = \sigma_{t1} &= -P_{k1}, \\ \text{при } r = c \quad \sigma_{r2} = \sigma_{t2} &= -P_{k2}, \\ \text{при } r = d \quad \sigma_{r3} &= -P_b. \end{aligned}$$



Условия сопряжения цилиндров:

при  $r = b$  ,  $U_1 = U_2$   $\sigma_{r1} = \sigma_{r2}$  ,

при  $r = c$  ,  $U_2 = U_3$   $\sigma_{r2} = \sigma_{r3}$  .

Используя формулу (4), граничные условия, а также учитывая, что  $P_a = 0$ , запишем выражение перемещений для первого цилиндра:

$$U_1 = -\frac{1-\nu_1}{E_1} P_{k1} \cdot r . \quad (7)$$

Аналогично запишем выражение для перемещений второго цилиндра.

$$U_2 = -\frac{1-\nu_2}{E_2} \frac{P_{k1}b^2 - P_{k2}c^2}{c^2 - b^2} r + \frac{1+\nu_2}{E_2} \frac{b^2c^2}{r} \frac{P_{k1} - P_{k2}}{c^2 - b^2} . \quad (8)$$

Аналогично для третьего цилиндра, причем  $P_b = P$ .

$$U_3 = -\frac{1-\nu_3}{E_3} \frac{P_{k2}c^2 - Pd^2}{d^2 - c^2} r + \frac{1+\nu_3}{E_3} \frac{d^2c^2}{r} \frac{P_{k2} - P}{d^2 - c^2} . \quad (9)$$

Используя граничное условие при  $r = b$  ,  $U_1 = U_2$  приравняем (7) и (8), заменив  $r$  на  $b$ , и выразим контактное давление  $P_{k2}$  через  $P_{k1}$ .

$$-\frac{1-\nu_1}{E_1} P_{k1}b = \frac{1-\nu_2}{E_2} \frac{P_{k1}b^2 - P_{k2}c^2}{c^2 - b^2} b + \frac{1+\nu_2}{E_2} bc^2 \frac{P_{k1} - P_{k2}}{c^2 - b^2} ;$$

$$P_{k2} = -\frac{P_{k1}(A - Bb^2 - C)}{(Bc^2 + C)} , \text{ или } P_{k2} = P_{k1} \cdot D , \quad (10)$$

$$\text{где } A = \frac{1-\nu_1}{E_1} b , \quad B = \frac{1-\nu_2}{E_2} \frac{b}{c^2 - b^2} , \quad C = \frac{1+\nu_2}{E_2} \frac{bc^2}{c^2 - b^2} , \quad D = \frac{A + Bb^2 + C}{Bc^2 + C} .$$

Используя граничное условие при  $r = c$   $U_2 = U_3$ , приравняем (8) и (9), заменив  $r$  на  $c$ , и выразим контактное давление  $P_{k2}$  через  $P_{k1}$

$$\frac{1-\nu_2}{E_2} \frac{P_{k1}b^2 - P_{k2}c^2}{c^2 - b^2} \cdot c + \frac{1+\nu_2}{E_2} b^2c \frac{P_{k1} - P_{k2}}{c^2 - b^2} =$$

$$= \frac{1-\nu_3}{E_3} \frac{P_{k2}c^2 - Pd^2}{d^2 - c^2} \cdot c + \frac{1+\nu_3}{E_3} d^2c \frac{P_{k2} - P}{d^2 - c^2} .$$

$$\text{Обозначим через: } I = \frac{1-\nu_2}{E_2} \frac{C}{c^2 - b^2} ; \quad F = \frac{1+\nu_2}{E_2} \frac{b^2c}{c^2 - b^2} ;$$

$$G = \frac{1-\nu_3}{E_3} \frac{C}{d^2 - c^2} ; \quad H = \frac{1+\nu_3}{E_3} \frac{d^2c}{d^2 - c^2} ;$$

$$IP_{k1}b^2 - P_{k2}c^2I + FP_{k1} - FP_{k2} = Gc^2P_{k2} - PGd^2 + HP_{k2} - HP ,$$

$$P_{k2} = \frac{P_{k1}(Ib^2 + F) + D(Gd^2 + H)}{(Ic^2 + Gc^2 + F + H)} , \text{ или } P_{k2} = \frac{P_{k1} \cdot N + J}{Q} , \quad (11)$$

$$\text{где } N = I \cdot b^2 + F , \quad J = P(Gd^2 + H) , \quad Q = I \cdot c^2 + G \cdot c^2 + F + H .$$

Приравнявая (10) и (11), находим  $P_{k1}$ :

$$\frac{P_{k1} \cdot N + J}{Q} = P_{k1} \cdot D , \quad P_{k1} = -\frac{J}{(N - DQ)} .$$

Определение напряжений, возникающих в цилиндрах:

для первого цилиндра  $\sigma_r = \sigma_t$  .

Для определения напряжений, возникающих во втором цилиндре, воспользуемся формулами (3) и, подставив реальные значения радиусов, получим:

$$\sigma_{r2} = \frac{P_{k1}b^2 - P_{k2}c^2}{c^2 - b^2} - \frac{b^2c^2}{r^2} \frac{P_{k1} - P_{k2}}{c^2 - b^2}, \sigma_{t2} = \frac{P_{k1}b^2 - P_{k2}c^2}{c^2 - b^2} + \frac{b^2c^2}{r^2} \frac{P_{k1} - P_{k2}}{c^2 - b^2}.$$

Для определения напряжений третьего цилиндра формулы (3) приобретают вид:

$$\sigma_{r3} = \frac{P_{k2}c^2 - P d^2}{d^2 - c^2} - \frac{d^2c^2}{r^2} \frac{P_{k2} - P}{d^2 - c^2}, \sigma_{t3} = \frac{P_{k2}c^2 - P d^2}{d^2 - c^2} + \frac{d^2c^2}{r^2} \frac{P_{k2} - P}{d^2 - c^2}.$$

Полученные модели позволяют оценить напряжения и перемещения во внутреннем объеме изделий мехатроники под воздействием различных механических нагрузок и выбрать оптимальное конструкторско-технологическое исполнение корпуса мехатронной системы, обеспечивающего работоспособность внутренних компонентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов*. – М. : Физматгиз, 1962. – 536 с.
2. Зайцев В.Ю. Корпусирование гетерогенных систем мехатроники, работающих в экстремальных условиях // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – М., 2004. – № 5. – С. 43–45.
3. Зайцев В.Ю. Модели тепловых процессов в электромонтажных соединениях // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего<sub>плюс</sub>* : Научно-методический журнал. – Пенза : ПГТА, 2013. – № 6 (10). – С. 72–76. – ISSN: 2221-951X
4. Зайцев В.Ю., Бородин Е.М. Методы обеспечения работоспособности изделий приборостроения // *Концепт* : Научно-методический электронный журнал. – ISSN: 2304-120X.

УДК 620.181:621.794

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАГРЕВА НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА МДО-ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ

© *О.Е. Чуфистов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

© *Е.А. Чуфистов, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)*

### EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HEATING INFLUENCE ON STRUCTURE, PHASE COMPOSITION AND PROPERTIES OF MAO-COATINGS ON ALUMINUM

© *O.Ye. Tchufistov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *Ye.A. Tchufistov, Penza State University (Penza, Russia)*

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния нагрева на структуру, фазовый состав и свойства МДО-покрытий на алюминии. Выявлено, что в температурном интервале 50...660 °С в наружных слоях МДО-покрытий происходят значимые изменения структуры и фазового состава. Установлена возможность повышения твердости и электрического сопротивления МДО-покрытий с помощью нагрева.

**Ключевые слова:** МДО-покрытие, нагрев, пористость, фазовый состав, твердость, напряжение пробоя, электросопротивление.

Results of experimental investigations of heating influence on structure, phase composition and properties of MAO-coatings on aluminum are presented. It is shown that in temperature interval 50...660 °C in outer layers of MAO-coatings on aluminum take place significant changes of structure and phase composition. Possibility of increase of hardness and electric resistance of MAO-coatings by means of heating is established.

**Key words:** MAO-coating, heating, porosity, phase composition, hardness, disruption voltage, electric resistance.

**E-mail:** kurator06m2@mail.ru, ea\_tchufistov@mail.ru

Микродуговое оксидирование (МДО) – высокопроизводительная разновидность электрохимического оксидирования в растворах электролитов, позволяющая получать на деталях из алюминиевых сплавов покрытия (МДО-покрытия), образующиеся в результате взаимодействия кислорода, выделяющегося из электролита, и алюминия, находящегося в поверхностных слоях деталей. Исследованиями, проведенными ранее [1, 2, 5], установлено, что МДО-покрытия преимущественно состоят из кристаллического оксида алюминия ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), а также содержат гидроксид алюминия, располагающийся около наружной поверхности покрытий, и соединения элементов электролита и сплава оксидируемой детали. При этом гидроксид алюминия в МДО-покрытиях может присутствовать в виде модификаций моногидроксида и тригидроксида.

Известно [4], что при нагреве тригидроксид алюминия, теряя адсорбированную влагу, может переходить в моногидроксид, а моногидроксид – в оксид. Поэтому с целью выявления особенностей данных переходов в МДО-покрытиях, их влияния на строение и свойства МДО-покрытий были проведены экспериментальные исследования, в качестве объектов которых использовали

МДО-покрытия на пластинах 20×20×2 мм из алюминия АД0, полученные в результате МДО длительностью 90 минут в водном растворе едкого кали (6 г/л) и борной кислоты (20 г/л) при анодной плотности тока 30 А/дм<sup>2</sup> и температуре раствора 45 °С. Ранее [2] было доказано, что указанные значения параметров МДО обеспечивают сочетание высокого содержания кристаллического оксида и гидроксида алюминия.

Нагрев МДО-покрытий с последующей выдержкой проводили в муфельной печи СНОЛ 3/10 при варьировании температуры от 50 до 660 °С и времени выдержки от 1 минуты до 5 часов.

Микроструктуру полученных МДО-покрытий исследовали с помощью оптического микроскопа МИМ-8 и растровых электронных микроскопов JSM-7700F, JSCXA-733 с использованием систем цифровой обработки изображения, обеспечивающих погрешность измерений не более 0,1 %. Фазовый состав МДО-покрытий изучали с помощью дифрактометров ДРОН-3М и ДРОН-4 с использованием изданий JCPDS по методике, обеспечивающей погрешность определения количественного содержания модификаций  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> около 3 % [3]. Микротвердость, напряжение пробоя и электрическое сопротивление покрытий измеряли, соответственно, с помощью микротвердомера ПМТ-3М, универсальной пробойной установки УПУ-1, терраомметров Е6-3 и ЕК6-7. В связи с 3%-й погрешностью методики количественного рентгенофазового анализа об изменении фазового состава судили не только по прямому признаку – изменению содержания фаз, но и по косвенным признакам – изменению пористости и физико-механических свойств МДО-покрытий.

Путем выдержки МДО-покрытий при нагреве в течение 100 минут с постепенным увеличением температуры с шагом 10 °С установлено, что нагрев МДО-покрытий до температур не выше 180 °С не вызывает значимых изменений их структуры, фазового состава и свойств. Выдержка при температуре 190 °С приводит к увеличению пористости МДО-покрытий и изменению их физико-механических свойств, при этом изменения содержания  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не наблюдается. В таблице 1 представлены значения содержания  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в МДО-покрытиях, а также их относительной пористости (П), твердости (H), напряжения пробоя (U) и электрического сопротивления (R) для разного времени выдержки при температуре 190 °С.

Таблица 1 – Значения показателей фазового состава, пористости и свойств МДО-покрытий в зависимости от времени выдержки при температуре 190 °С

| $\tau$ , мин                                 | -    | 1    | 3    | 10   | 30   | 100  | 300  |
|----------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | 32   | 32   | 32   | 32   | 32   | 32   | 32   |
| $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | 45   | 45   | 45   | 45   | 45   | 45   | 45   |
| П*, %                                        | 11,1 | 11,1 | 11,1 | 11,4 | 12,4 | 12,6 | 12,6 |
| H*, ГПа                                      | 14,1 | 14,1 | 14,1 | 14,1 | 14,2 | 14,2 | 14,2 |
| U, В                                         | 2330 | 2330 | 2330 | 2320 | 2295 | 2290 | 2290 |
| R, 1×10 <sup>15</sup> Ом                     | 0,39 | 0,39 | 0,40 | 0,41 | 0,44 | 0,45 | 0,45 |

\*Примечание. П и H в поверхностном слое покрытия толщиной около 30 мкм.

Можно отметить некоторое увеличение П и уменьшение U при отсутствии значимых изменений других показателей. Это согласуется с результатами других исследований [4], согласно которым при таких температурах происходит переход тригидроксида алюминия в моногидроксид, имеющий более высокую плотность и более высокие физико-механические свойства. Причем изменение структуры и свойств покрытий при нагреве происходит в течение 10...100 ми-

нут, т.е. меньшая выдержка недостаточна для начала описанных изменений, а большая нецелесообразна, поскольку они полностью успевают завершиться.

Выдержка покрытий в течение 100 минут при более высоких температурах, но не превышающих 270 °С, приводит к таким же результатам, что и выдержка при температуре 190 °С. Однако с увеличением температуры изменения  $\Pi$  и  $U$  происходят быстрее. Если при температуре 190 °С для этого требуется 100 минут, то при 270 °С – не более 30 минут.

Выдержка покрытий при температуре 280 °С приводит к повышению содержания  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , увеличению  $\Pi$ ,  $H$ ,  $R$  и уменьшению  $U$ . В табл. 2 представлены характеристики покрытий для разного времени выдержки при температуре 280 °С.

Таблица 2 – Значения показателей фазового состава, пористости и свойств МДО-покрытий в зависимости от времени выдержки при температуре 280 °С

| $\tau$ , мин                           | -    | 1    | 3    | 10   | 30   | 100  | 300  |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , % | 32   | 32   | 32   | 32   | 33   | 33   | 33   |
| $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , % | 45   | 45   | 45   | 46   | 50   | 51   | 51   |
| $\Pi^*$ , %                            | 11,1 | 11,2 | 11,5 | 12,6 | 14,6 | 15,0 | 15,0 |
| $H^*$ , ГПа                            | 14,1 | 14,1 | 14,1 | 14,2 | 14,3 | 14,4 | 14,5 |
| $U$ , кВ                               | 2330 | 2325 | 2320 | 2280 | 2230 | 2220 | 2220 |
| $R, 1 \times 10^{15}$ Ом               | 0,39 | 0,40 | 0,41 | 0,53 | 1,23 | 1,47 | 1,47 |

\*Примечание.  $\Pi$  и  $H$  в поверхностном слое покрытия толщиной около 30 мкм.

Данные табл. 2 указывают на переход гидроксида алюминия в  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Согласно данным других исследований [4], при такой температуре с потерей влаги протекает переход одной из модификаций моногидроксида алюминия – бемита в  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , который имеет более высокую плотность и более высокие физико-механические свойства. Поэтому у МДО-покрытий увеличиваются  $H$  и  $R$ . Однако вследствие того, что при данном переходе увеличивается  $\Pi$  МДО-покрытий, снижается их  $U$ . Данный переход также происходит в течение 10...100 минут.

Выдержка МДО-покрытий при более высоких температурах, но не превышающих 470 °С, способствует более быстрому протеканию аналогичных изменений, однако в конечном итоге не вызывает новых значимых изменений структуры, фазового состава и свойств.

Выдержка покрытий при температуре 480 °С приводит к увеличению содержания  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , уменьшению пористости и изменению физико-механических свойств покрытий. В табл. 3 представлены характеристики МДО-покрытий для разного времени выдержки при температуре 480 °С.

Таблица 3 – Значения показателей фазового состава, пористости и свойств МДО-покрытий в зависимости от времени выдержки при температуре 480 °С

| $\tau$ , мин                           | -    | 1    | 3    | 10   | 30   | 100  | 300  |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , % | 32   | 32   | 32   | 33   | 35   | 36   | 36   |
| $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , % | 45   | 45   | 45   | 49   | 51   | 51   | 51   |
| $\Pi^*$ , %                            | 11,1 | 11,5 | 12,7 | 15,0 | 16,2 | 16,5 | 16,5 |
| $H^*$ , ГПа                            | 14,1 | 14,1 | 14,3 | 14,4 | 14,6 | 14,7 | 14,7 |
| $U$ , кВ                               | 2330 | 2320 | 2275 | 2210 | 2180 | 2175 | 2175 |
| $R$ , ПОм                              | 0,39 | 0,41 | 0,45 | 1,00 | 2,12 | 2,38 | 2,38 |

\*Примечание.  $\Pi$  и  $H$  в поверхностном слое покрытия толщиной около 30 мкм.

Согласно данным других исследований [4], при температуре 480 °С происходит переход твердой модификации моногидроксида алюминия – диаспора – в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , который имеет более высокую плотность и более высокие физико-механические свойства, поэтому у покрытий увеличиваются  $H$  и  $R$ , но

вследствие того, что при данном переходе увеличивается  $\Pi$ , снижается  $U$ . Данный переход также происходит в течение 10...100 минут.

Выдержка покрытий при более высоких температурах, вплоть до 660 °С, с оплавлением алюминия под покрытием способствует более быстрому протеканию указанных изменений, но не дает качественных изменений структуры, фазового состава и физико-механических свойств.

Важно отметить, что повышенные значения  $H$  и  $U$  и пониженные значения  $R$  наблюдаются у МДО-покрытий, последовательно прошедших выдержку в трех температурных интервалах – 190...270, 280...470 и 480...660 °С. По пористости и содержанию  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  они практически не отличаются от МДО-покрытий, прошедших единовременную выдержку в температурном интервале 480...660 °С, но имеют менее дефектную структуру.

Описанные факты свидетельствуют о том, что в температурном интервале 50...660 °С в наружных слоях покрытий, формируемых МДО на алюминии и его сплавах, имеют место изменения как минимум трех видов. В результате каждого изменения гидроксида алюминия, располагающиеся в наружных слоях покрытий, теряют влагу и переходят в более плотные вещества. При этом повышается пористость покрытий в наружных слоях, уменьшается их напряжение пробоа, увеличиваются твердость и электрическое сопротивление.

Последовательная выдержка МДО-покрытий в трех температурных интервалах – 190...27, 280...470 и 480...660 °С обеспечивает последовательное завершение описанных изменений в МДО-покрытиях. Это предотвращает ускоренное изменение объема отдельных структурных составляющих МДО-покрытий и формирование дефектной структуры с трещинами и микроразрушениями, а следовательно, обеспечивает более высокие значения твердости и электрической прочности.

Кроме того, с учетом выявленных изменений и соотношений объемов алюминия и веществ, образующихся при его окислении в процессе МДО, можно полагать, что МДО-покрытия, на которых были построены настоящие исследования, содержат примерно по 5...6 % диаспора, бемита и тригидроксида алюминия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атрощенко Э.С. *Технология получения покрытий различного функционального назначения микродуговым оксидированием* / Атрощенко Э.С., Казанцев И.А., Чуфистов О.Е. [и др.] // *Практика противокоррозионной защиты*. – 1999. – № 3 (13). – С. 32–39.
2. Атрощенко Э.С., Чуфистов О.Е., Казанцев И.А., Камышанский С.И. *Формирование структуры и свойств покрытий, получаемых микродуговым оксидированием, на изделиях из алюминиевых сплавов* // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2000. – № 10. – С. 34–38.
3. Колеров О.К., Скрыбин В.Г., Калышенко М.Ф. *О рентгенодифрактометрическом исследовании тонкой структуры поликристаллов* // *Заводская лаборатория*. – 1985. – № 9. – С. 46–48.
4. *Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов* / Под. ред. Г. Брауна. – М. : Мир, 1965. – 599 с.
5. Чуфистов О.Е., Чуфистов Е.А., Артемьев В.П. *Технология, строение и свойства покрытий, формируемых методами анодного оксидирования на алюминии и его сплавах* // *Цветные металлы*. – 2009. – № 10. – С. 57–61.

УДК 519.7:691: 517.9

**ОПЫТ РАЗРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ  
С ПОЗИЦИЙ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

© *И.А. Гарькина, Пензенский государственный университет архитектуры  
и строительства (г. Пенза, Россия)*

© *А.М. Данилов, Пензенский государственный университет архитектуры  
и строительства (г. Пенза, Россия)*

© *И.А. Прошин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

**EXPERIENCE THE DEVELOPMENT OF MATERIALS  
BASED SYSTEMS APPROACH**

© *I.A.Garkina, Penza state university of architecture and Construction  
(Penza, Russia)*

© *A.M.Danilov, Penza state university of architecture and Construction  
(Penza, Russia)*

© *I.A. Proshin, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

На основе длительного опыта работы по созданию композиционных материалов специального назначения предлагаются методологические принципы синтеза материалов с использованием системного подхода. Приводятся примеры реализаций.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, проектирование, системный подход, моделирование.

On the basis of long experience to the development of composite materials for special purposes methodological principles of synthesis of materials using a systems approach are considered.

**Key words:** composite materials, design, system approach, modeling.

**E-mail:** regas@pguas.ru

Системный подход на сегодня представлен мозаикой отдельных направлений, плохо скоординированных между собой. Это относится и к системным исследованиям в области синтеза материалов.

С момента основания Людвигом фон Берталанфи в 1954 г. «Общества по исследованию в области общей теории систем» и формулировки задач общей теории систем в системном подходе появился ряд направлений: *целеустремленные системы* (Р. Акофф), *функциональные системы* (П.К. Анохин), *системы гомеостатического типа* (Ю.Н. Горский), *системы как триада «вещь – свойство – отношение»* (А.И. Уемов), *общая теория систем* (Ю.А. Урманцев). Определились и *основные задачи*: разработка математического аппарата; описание разных типов систем; установление изоморфизма (соответствие между объектами, выражающее тождество их структуры (строения)) законов в различных областях знания. К сожалению, *ни одна версия системного подхода по стандартам научности XXI века не получила развития до ранга теории*.

Существуют различные мнения относительно системных исследований: от восторженного до оценки системного анализа как «несостоявшейся» науки (Н.Н. Моисеев). Что касается их практического приложения, то, как отмечается рядом авторов, *«есть только отдельные опыты применения системной методологии, причем и они отличаются сравнительно небольшим масштабом решаемых задач; ...системный подход к настоящему времени реализует себя, скорее, как искусство, чем как наука, технология и учебная дисциплина»* [1]. Налицо потребность и демонстрация возможностей разработок в области синтеза систем.

Наблюдающееся в последнее время быстрое отделение друг от друга философии и математики привело к возникновению ряда неразрешимых теоретических и прикладных задач синтеза систем. Известно, что философский подход не ставит своей целью разрешения проблемы, а лишь обозначает ее.

Одним из наиболее перспективных направлений системных исследований считается решение в той или иной форме *проблемы «черного ящика»*. А именно, сначала производится замена физических процессов в некотором блоке-преобразователе *множеством передаточных функций*, согласующих параметры входов и выходов системы: выявляются *типовые* физические процессы, позволяющие онтологизировать передаточные функции и придать физическое соответствие переменным в уравнении. Для замены «черного ящика» «серым» используются *модели гомеостатического типа*, обладающие определенной универсальностью и возможностью физического толкования процессов.

*Основным междисциплинарным подходом является синергетика с анализом бифуркаций* (точек пространства, в которых происходит выбор и где сложную систему можно направить по различным траекториям).

Оценка *сложности системы* может производиться по-разному. Так, по Колмогорову, сложность объекта определяется, как *минимальный размер количества информации, задающей этот объект*.

*Адекватность модели* определяется принятыми *принципиальными гипотезами* о механизмах функционирования объекта. В последнее время все чаще при моделировании используется *метод погружения*, в котором используются модели простых вспомогательных систем, мажорирующих или минорирующих поведение изучаемой системы.

Несмотря на значительные успехи классической науки, в рамках существенных ограничений на системы становится невозможным их синтез. *Основной проблемой синтеза* при системном подходе является усиливающаяся *фрагментация знания*. Требуется аппарат синтеза, основанный на интеграции междисциплинарных категорий с его развитием до уровня математической теории, в основе которой *лежит идеальный объект, заданный в системе аксиом и способный выходить на уровень приложений в разных областях*.

В качестве иллюстрации рассмотрим результаты *комплексных исследований с позиций системного анализа* научных и технических проблем [2–5], связанных с разработкой *материалов специального назначения* с заданным комплексом эксплуатационных свойств, а также с созданием базы компьютерного проектирования и управления технологией их производства. Исследования включают: математическое моделирование, вычислительный эксперимент, разработку методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза и идентификации материалов как сложных систем. Актуальность этих исследований продиктована необходимостью синтеза композиционных материалов для обеспечения безопасности деятельности объектов ядерной энергетики, химически опасных производств и др.

*Основной научно-технической задачей*, связанной с разработкой таких материалов, является *установление взаимосвязи состава, технологии производства, а также структуры и свойств материала*. Наличие в композиционных материалах *границы раздела фаз* определяет *интенсивность процессов формирования структуры* (выделяет такие материалы из механических смесей компонентов). Изучение процессов структурообразования материала, разработка способов и поиск компонентов для повышения его качества, а также уточнение существующих и введение новых характеристик материала позво-



ляет совершенствовать методы проектирования и прогнозирования влияния рецептуры на свойства композита.

При исследованиях *композиционный материал* рассматривается как *сложная система* [6–8], состоящая из элементов различного уровня детализации: от атомного до отдельного процесса. Система представляется как совокупность взаимодействующих элементов. Так как сущность системы нельзя понять, рассматривая только свойства элементов, то изучаются как способы взаимодействия элементов, так и взаимодействие элементов и системы с окружающей средой. В частности, анализ отдельных стадий процесса без выявления взаимосвязи между ними и с окружающей средой не дает возможности судить обо всем технологическом процессе. Так, массоперенос вещества осуществляется на нескольких технологических переделах: при химической реакции взаимодействия вяжущего с активатором; при перемешивании компонентов; тепловой обработке и др. В частности, при создании радиационно-защитных композиционных материалов на основе анализа технологического процесса выделялись *несколько уровней иерархии*, между которыми существуют *отношения подчиненности*. В основе создания композиционных материалов специального назначения лежит *иерархическая структура критериев качества*.

В соответствии с ней строилась *иерархическая структура композиционного материала*. Учитывались элементарные процессы технологии: химические, массообменные, тепловые, механические и др. При анализе отдельных процессов в качестве элементов иерархической структуры рассматривались и явления, *в совокупности* определяющие *целевую функцию* процесса (химические превращения, теплообмен и т.д.). На основе общих принципов системного анализа производилась *декомпозиция* системы, устанавливались *связи между подсистемами*. По существу, разработка *методологических принципов синтеза композиционных материалов* напрямую связана с разработкой иерархических структур.

Синтез композиционных материалов специального назначения естественным образом сводится к *последовательному решению следующих задач*:

- анализ и моделирование кинетических процессов формирования основных физико-механических характеристик материала (*структурная и параметрическая идентификация*);
- формализация оценки и оптимизация качества кинетических процессов по каждому из свойств в отдельности на основе специально разработанных *функционалов качества*;
- определение приоритетов, ранжирование критериев качества и *многокритериальный синтез* композиционных материалов с применением различных алгоритмов векторной оптимизации (сведение к *лексикографической задаче*, *метод последовательных уступок*, *скаляризация*; *построение множеств Парето*; *сведение к задаче нелинейного программирования* и др.);
- определение рецептурно-технологических параметров.

Возможен и *другой подход* к синтезу: на основе определения интегративных свойств систем с использованием *автономных исследований отдельных подсистем*. Здесь композиционные материалы рассматриваются как большие сложные системы, сформированные по *модульному принципу*. Декомпозиция системы на *отдельные подсистемы* осуществляется с учетом *определенной степени* их автономности. Каждый элемент иерархической структуры системы, находящийся на определенном уровне, представляется как модуль. С ростом уровня иерархии (понижение номера уровня) происходит объединение модулей в более крупные. Объединение отдельных подсистем в единую систему производится с учетом межсистемных связей. Каждый элемент в иерархической

структуре качества системы автономно (без учета *всех* межсистемных связей) определяет качество сепаратной системы. Результаты автономных исследований модулей далее используются для определения интегративных свойств, правда, в основном лишь *на качественном уровне*. Естественно, *интегративные свойства системы определяются связями между модулями, уровнями и на каждом из уровней*. Устранение межсистемных связей при автономных исследованиях сепаратных подсистем (для синтеза системы в целом) можно обеспечить *введением настраиваемых эталонных моделей с одновременной децентрализацией модулей по входам*.

Определение класса задач и условий для использования эталонных моделей, важных для переноса результатов автономных исследований на систему в целом связано, естественно, с полнотой понимания процессов формирования структуры и свойств системы. Так, при определении некоторых свойств материала в зависимости от гранулометрического состава можно использовать ингредиенты из других материалов, но с тем же гранулометрическим составом, что и в синтезируемом материале. Здесь необходимо лишь обеспечить аналогичные, по возможности точные, межсистемные связи (например, смачиваемость). Или при переносе результатов автономных исследований смачиваемости на формирование структуры и свойств материала необходимо знать параметры смачиваемости входящих компонентов в стесненных условиях. Принципиально это можно обеспечить с использованием настраиваемой эталонной модели, предусматривающей регулирование давления между компонентами. Настройку можно обеспечить с использованием экспериментальных данных на образцах. Вообще говоря, идея использования эталонных моделей с децентрализацией модулей по входам не нова (использовалась в авиации и космонавтике).

Заметим, традиционно используемые данные о кинетических процессах формирования структуры и физико-механических характеристик материала по существу являются автономными исследованиями отдельных сепаратных модулей. При этом требуемые параметры кинетических процессов определяются с учетом межсистемных связей (неявно присутствуют эталонные модели, предусматривающие одновременную децентрализацию по входам).

Таким образом, целесообразно использование следующей методологии *проектирования систем* [9]. В ее основе – *общая* формулировка технического задания на проектирование (рис. 1). Разработка (синтез) материала осуществляется *методом моделирования* (частные модели для описания отдельных свойств системы). Множество взаимосвязанных моделей с необходимой точностью будет описывать систему, отражая всю совокупность ее свойств. Естественно, материал (*объект*) рассматривается как *система* (системный объект):

- создается ради определенной цели;
- развивается (изменяется) в процессе достижения цели;
- управление осуществляется на основе информации о его состоянии и состоянии внешней среды с использованием моделирования поведения объекта;
- состоит из взаимосвязанных компонентов, выполняющих определенные функции;
- возможность управления свойствами целостной системы обеспечивается свойством эмерджентности.

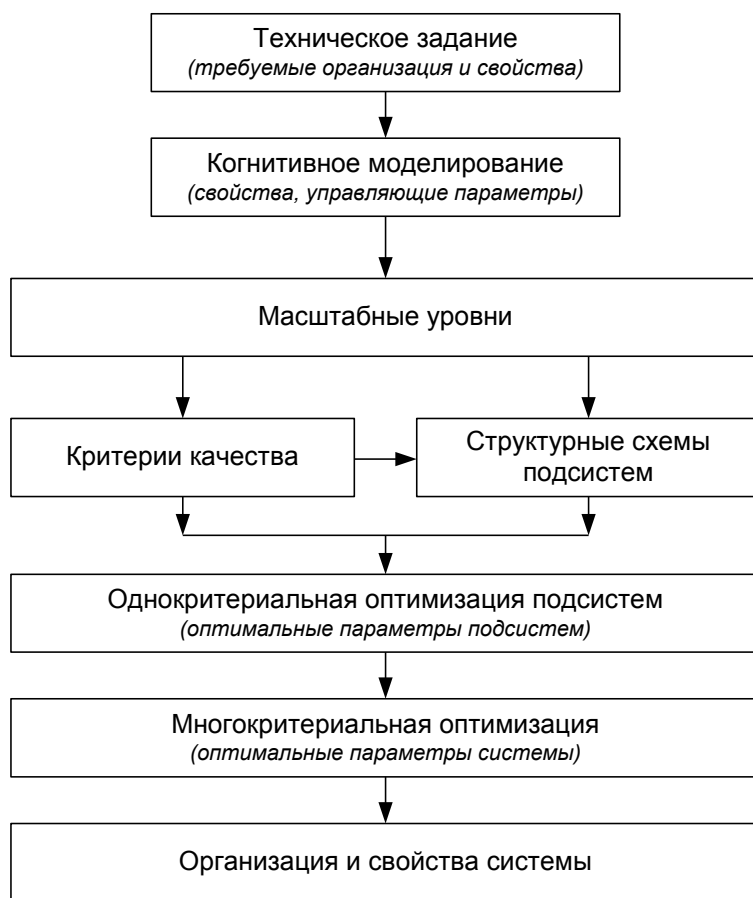


Рисунок 1 – Синтез сложной системы

Фактически проектирование системы (материала) сводится к построению ее сложной модели [10]. Проект системы объединяет частные, взаимосвязанные, взаимообусловленные модели. Определяется *иерархия систем* – расположение частей или элементов целого в порядке от высшего к низшему. Проект представляет собой ряд зависимостей между целями проектирования, возможными целями их достижения, окружающей средой и ресурсами. Можно рассматривать и как сложную модель, отражающую все интересующие свойства будущей реальной системы.

Выбор некоторого проектного решения из возможных альтернативных вариантов (*средство достижения целей проектирования*) осуществляется на основе некоторого показателя (критерия выбора), *обобщенно* характеризующего степень достижения поставленной цели тем или иным вариантом проекта. На этом этапе система рассматривается как совокупность взаимосвязанных, управляемых подсистем, *объединенных общей целью* функционирования для решения заданной проблемы в некотором *диапазоне условий*. При выборе рационального варианта и оптимизации его параметров *желательно использовать* показатель «эффективность – стоимость», отражающий соотношение между эффективностью решения поставленной задачи и суммарными затратами на решение (обеспечение максимальной эффективности при заданных затратах или обеспечение минимальной стоимости при заданном уровне эффективности). При решении отдельных задач, в том числе обороны страны, этот показатель иногда по существу и не учитывается.

При проектировании системы с длительным периодом эксплуатации следует учитывать не только сегодняшнее состояние среды, но и прогнозируемые изменения (на систему влияют любые *изменения внешней среды*; верно и обратное). Отсутствие абсолютной уверенности в прогнозировании проектируемой системы приводит к необходимости предусмотреть возможность ее различных *модификаций*.

Наконец, проектирование с системных позиций – это проектирование части целого как элемента целого: *критерием оценки является обобщенный показатель, обеспечивающий оптимальность всей системы в принятом смысле.*

Однако, справедливости ради, отметим, что пока иерархическая структура композиционного материала (соответствует иерархической структуре критериев качества) не дает четкого представления ее как сложно организованной системы, в которой постоянно происходит большое количество *параллельных* процессов. На определенном этапе формирования материала горизонтальные связи на каждом из уровней иерархии могут оказаться сравнимыми или даже превышать межуровневые связи. До конца остается неясным, каким образом на основе различных дифференцированных функций компонентов и их связей между собой определяется система с четкой самоорганизацией, даже при изменении внешних условий.

Результаты приведенных междисциплинарных исследований на основе системного подхода могут служить основой создания современных технологий получения материалов специального назначения с заданными свойствами и прошли неоднократную апробацию при создании материалов для защиты от ионизирующих излучений [11].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизиков В.П., Разумов В.И. Кризис системной методологии: с позиций синтеза систем // Идентификация систем и задачи управления : Труды V Международной конференции SICPRO'06. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2006. – С. 1818–1860. – [www.sicpro.org](http://www.sicpro.org). – ISBN 5-201-14984-7.
2. Гарькина И.А., Данилов А.М., Лапшин Э.В., Юрков Н.К. Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1(9). – С. 3–11.
3. Гарькина И.А., Данилов А.М., Смирнов В.А. Флокуляция в дисперсных системах // Системы управления и информационные технологии. – 2008. – № 2.3(32). – С. 344–347.
4. Данилов А.М., Домке Э.Р., Гарькина И.А. Формализация оценки оператором характеристик объекта управления // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 2 (70). – С. 5–11.
5. Гарькина И.А., Данилов А.М. Управление в сложных технических системах: методологические принципы управления // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1 (12). – С. 39–43.
6. Гарькина И.А., Данилов А.М., Королёв Е.В. Когнитивное моделирование при синтезе композиционных материалов как сложных систем // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 3/4. – С. 30–37.
7. Прошин И.А., Бормотов А.Н. Исследование реологических свойств композиционных материалов методами системного анализа // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2009. – Т. 15. – № 4. – С. 916–925.

8. Прошин И.А., Бормотов А.Н., Васильков А.В. Теоретические основы компьютерного моделирования структурообразования дисперсных систем // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17. – № 2. – С. 542–551.

9. Данилов А.М., Гарькина И.А. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения // Известия ВУЗов. Строительство. – 2011. – № 1. – С. 80–85.

10. Будылина Е.А., Гарькина И.А. Данилов А.М. Моделирование с позиций управления в технических системах // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 2(16). – С. 138–143.

11. Системный анализ в строительном материаловедении : Монография / Баженов Ю.М., Гарькина И.А., Данилов А.М., Королёв Е.В. – М. : МГСУ; Библиотека научных разработок и проектов, 2012. – 432 с.

УДК 621.793:621.794

# **ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПРЕИМУЩЕСТВЕННО СОСТОЯЩИХ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, НА ДЕТАЛЯХ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

© **О.Е. Чуфистов**, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© **Е.А. Чуфистов**, Пензенский государственный университет  
(г. Пенза, Россия)

© **В.П. Артемьев**, Кубанский государственный технологический университет  
(г. Краснодар, Россия)

## **FORMATION OF COATINGS CONSISTING MAINLY OF ALUMINUM OXIDE ON DETAILS FROM CARBON STRUCTURAL STEELS**

© **O.E. Tchufistov**, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© **E.A. Tchufistov**, Penza State University (Penza, Russia)

© **V.P. Artem'ev**, Kuban State Technological University (Krasnodar, Russia)

Показана возможность получения покрытий, состоящих из оксида алюминия, на деталях из углеродистых сталей путем комплексной обработки, включающей жидкостное алитирование и анодное оксидирование. Установлено, что в процессе алитирования на деталях образуются металлические покрытия, у которых наружные слои состоят из алюминия, а внутренние слои состоят из интерметаллических соединений алюминия и железа. Доказана целесообразность прекращения процесса формирования покрытий, состоящих из оксида алюминия, до начала окисления внутренних слоев металлических покрытий.

**Ключевые слова:** конструкционные углеродистые стали, жидкостное алитирование, анодное оксидирование, ТА-покрытия, МДО-покрытия.

Possibility of obtaining coatings consisting of aluminum oxide on details from carbon steels by comprehensive processing including hot-dip aluminizing and anodic oxidation is shown. It is established that during aluminizing on steel detail are formed metallic coatings whose outer layers consist of aluminum and inner layers consist of intermetallic compound of aluminum and iron. Expediency of stopping of formation process of coatings consisting of aluminum oxide before oxidation of inner layers of metallic coatings is proved.

**Key words:** carbon structural steels, hot-dip aluminizing, anodic oxidation, EB-coatings, MAO-coatings.

**E-mail:** kurator06m2@mail.ru, ea\_tchufistov@mail.ru, artemyev@kubstu.ru

Методы анодного оксидирования в растворах электролитов, к числу которых относятся традиционное анодирование (ТА) и микродуговое оксидирование (МДО), позволяют получать на деталях из алюминиевых сплавов покрытия, образующиеся в результате окисления алюминия поверхностных слоев деталей кислородом, выделяющимся из растворов электролитов. Данные покрытия преимущественно состоят из аморфного или кристаллического оксида алюминия и обладают высокими механическими и электрофизическими свойствами [5].

Большой практический интерес представляют разработки технологических процессов получения аналогичных покрытий на деталях из других материалов. В настоящей работе исследовано формирование покрытий, преимущественно состоящих из оксида алюминия, на деталях из конструкционных углеродистых сталей путем их комплексной обработки, включающей жидкостное алитирование и анодное оксидирование в водных растворах электролитов.

В процессе проведения исследований покрытия получали на дисках диаметром 30 мм толщиной 10 мм, изготовленных из качественных конструкционных углеродистых сталей 08, 20, 40, 60.

Жидкостное алитирование осуществляли согласно известным рекомендациям [1]. Непосредственно перед алитированием проводили химическую подготовку и флюсование поверхностей дисков. При этом диски выдерживали в 16%-м растворе соляной кислоты в течение 1...2 минут, промывали проточной водой и сушили, обдувая горячим воздухом. Затем диски выдерживали в течение 5 минут во флюсе, в качестве которого использовали расплав хлоридов калия и натрия в соотношении 1:1, нагретый до температуры 750...760 °С. Далее диски извлекали из флюса, погружали в расплав электротехнического алюминия, нагретый до 750 °С, и выдерживали 5...6 минут, сообщая им поступательные и вращательные движения. По извлечению дисков из расплава электротехнического алюминия их поверхности ускоренно охлаждали до температуры 200...300 °С, распыляя на них воду из пульверизатора, после чего промывали водой до полного удаления следов флюса.

ТА проводили в водном растворе щавелевой кислоты (25 г/л) при температуре раствора 15 °С и анодной плотности тока 3 А/дм<sup>2</sup>. МДО проводили в водном растворе едкого кали (6 г/л) и низкоомного жидкого стекла (5 г/л) при температуре раствора 15 °С и анодной плотности тока 25 А/дм<sup>2</sup>.

Микроструктуру поверхностных слоев дисков исследовали с помощью металлографических микроскопов МИМ-7, МИМ-8 и растрового электронного микроскопа JSM-7700F с применением систем цифровой обработки изображения. Распределение химических элементов в поверхностных слоях дисков изучали с помощью рентгеновского микроанализатора JCSA-733 Superprobe. Фазовый состав поверхностных слоев дисков определяли с помощью дифрактометров ДРОН-3М и ДРОН-4. Микротвердость, напряжение пробоя и электрическое сопротивление поверхностных слоев дисков измеряли на микротвердомере ПМТ-3М, пробойной установке УПУ-1, терраомметрах Е6-3 и ЕК6-7, соответственно. Износостойкость поверхностных слоев дисков определяли по результатам их испытаний на трение и изнашивание на модернизированной установке Х4-Б по схеме палец-диск при среднем давлении в контакте 0,1...0,2 МПа, закрепляя на поверхности контртела наждачную бумагу с абразивными частицами карбида кремния зеленого размером 50...63 мкм, для варьирования длины пути трения испытания проводили за 5...6 циклов с заменой наждачной бумаги перед каждым циклом.

Установлено, что жидкостное алитирование в расплаве электротехнического алюминия в сочетании с предварительной химической подготовкой по-

верхности и флюсованием обеспечивает формирование на деталях из конструкционных углеродистых сталей горячих алюминиевых покрытий, средние значения толщины которых находятся в интервале 101...129 мкм. По толщине данных покрытий можно условно выделить слои двух видов – наружные, преимущественно состоящие из алюминия, имеющие среднее значение толщины 52...59 мкм, и внутренние, преимущественно состоящие из интерметаллических соединений железа и алюминия и имеющие среднее значение толщины 49...70 мкм. При этом ввиду неравномерности горячих алюминиевых покрытий максимальные и минимальные значения толщины наружных и внутренних слоев имеют значимые отличия от ее средних значений – примерно на  $\pm 10\%$ . На рис. 1 отражены средние значения толщины внутренних и наружных слоев горячих алюминиевых покрытий на дисках, изготовленных из разных марок качественных конструкционных углеродистых сталей.

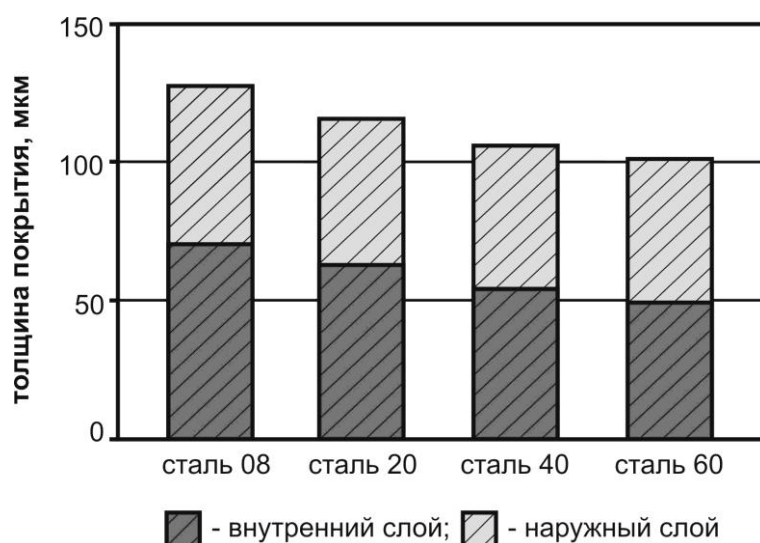


Рисунок 1 – Значения толщины горячих алюминиевых покрытий, их внутренних и наружных слоев

Полезно заметить, что на дисках из сталей с меньшим содержанием углерода получаются более толстые горячие алюминиевые покрытия. От горячих алюминиевых покрытий, формируемых на дисках из сталей с более высоким содержанием углерода, они, прежде всего, отличаются большей толщиной внутренних слоев, содержащих интерметаллические соединения алюминия и железа.

Выявлено, что во внешних слоях горячих алюминиевых покрытий содержание железа находится в пределах 3 %, а во внутренних слоях находится в интервале 37...74 %. Причем содержание железа значительно изменяется по толщине внутреннего слоя, увеличиваясь по мере удаления от его границы с наружным слоем вглубь детали.

Обработка методами ТА и МДО обеспечивает формирование на алитированных поверхностях дисков покрытий, преимущественно состоящих из оксида алюминия. Покрытия, формируемые методом ТА (ТА-покрытия), преимущественно аморфны и в основном состоят из аморфного оксида алюминия, а также содержат гидроксид алюминия и соединения алюминия с элементами раствора электролита. Покрытия, формируемые методом МДО (МДО-покрытия), преимущественно имеют поликристаллическую структуру и в основном состоят из модификаций кристаллического оксида алюминия –  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  и  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , а так-

же содержат аморфный оксид алюминия, гидроксид алюминия и соединения алюминия с элементами раствора электролита. При этом содержание  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  не превышает 25 %, а содержание  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  не превышает 45 %.

Важно отметить, что в процессе оксидирования толщина ТА-покрытий постепенно увеличивается и в течение 35...60 минут достигает 60...73 мкм, после чего рост ТА-покрытий существенно замедляется, а на их поверхностях появляются следы растравливания. Толщина МДО-покрытий увеличивается в течение 17...24 минут, достигая 69...85 мкм, после чего рост толщины МДО-покрытий существенно замедляется, а на их поверхностях также появляются следы растравливания. На рис. 2 показаны значения толщины ТА- и МДО-покрытий на момент появления на их поверхностях первых визуально идентифицируемых следов растравливания.

К моменту замедления роста толщины и появления следов растравливания ТА- и МДО-покрытия располагаются в непосредственной близости от внутренних слоев горячих алюминиевых покрытий. Причем на дисках из сталей 40 и 60 ТА- и МДО-покрытия граничат исключительно с тонкими прослойками неокисленных наружных слоев горячих алюминиевых покрытий, а на дисках из сталей 08 и 20 на немногих непротяженных участках длиной до 5 мкм, на которых отсутствуют прослойки неокисленных наружных слоев горячих алюминиевых покрытий, ТА- и МДО-покрытия непосредственно граничат с их внутренними слоями. Кроме того, в ТА- и МДО-покрытиях со следами растравливания установлено присутствие железа, содержание которого находится в пределах 3 %.

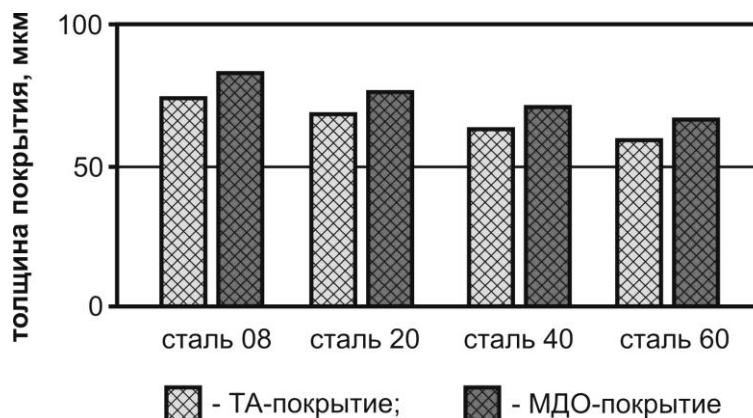


Рисунок 2 – Значения толщины ТА- и МДО-покрытий

Растравливания ТА- и МДО-покрытий можно избежать путем снижения времени ТА и МДО на 10...15 %. В результате этого получаются ТА- и МДО-покрытия меньшей толщины, но имеющие качественную равномерную структуру и достаточно высокие механические и электрофизические свойства. В табл. 1 и 2 представлены статистически обработанные результаты экспериментальных измерений значений толщины ( $\delta$ ), твердости в средней зоне ( $H$ ), линейного износа ( $I$ ), электрического сопротивления ( $R$ ) и напряжения пробоя ( $U$ ) данных покрытий.

Результаты, представленные в таблицах 1 и 2, доказывают возможность получения методами ТА и МДО на алитированных поверхностях деталей из конструкционных углеродистых сталей ТА- и МДО-покрытий, по свойствам сопоставимых с аналогичными покрытиями на поверхностях деталей из алюминия и его деформируемых сплавов.



## ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ, ПРЕИМУЩЕСТВЕННО СОСТОЯЩИХ...

Необходимо заметить, что в процессе исследований механических и электрофизических свойств ТА- и МДО-покрытий не было выявлено фактов отслаивания горячих алюминиевых и ТА- и МДО-покрытий, что указывает на их прочное сцепление с материалом основы.

Таблица 1 – Характеристики ТА-покрытий

| Марка стали диска | Длительность ТА, мин. | Характеристики ТА-покрытия |                                              |                                              |        |        |                        |         |
|-------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------|--------|------------------------|---------|
|                   |                       | $\delta$ , мкм             | $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | H, ГПа | И, мкм | R, 10 <sup>12</sup> Ом | U, В    |
| 08                | 52                    | 69,47                      | -                                            | -                                            | 4,74   | 18,61  | 7,50                   | 1194,84 |
| 20                | 41                    | 63,29                      | -                                            | -                                            | 4,71   | 20,23  | 6,89                   | 1088,17 |
| 40                | 33                    | 56,15                      | -                                            | -                                            | 4,67   | 22,30  | 6,07                   | 961,09  |
| 60                | 31                    | 54,03                      | -                                            | -                                            | 4,65   | 22,94  | 5,81                   | 918,95  |

Таблица 2 – Характеристики МДО-покрытий

| Марка стали диска | Время обработки, мин. | Характеристики МДО-покрытия |                                              |                                              |        |        |                        |         |
|-------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------|--------|------------------------|---------|
|                   |                       | $\delta$ , мкм              | $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , % | H, ГПа | И, мкм | R, 10 <sup>14</sup> Ом | U, В    |
| 08                | 19                    | 74,83                       | 24,74                                        | 41,34                                        | 16,03  | 10,34  | 1,70                   | 1070,17 |
| 20                | 18                    | 70,06                       | 20,48                                        | 43,73                                        | 15,67  | 11,27  | 1,54                   | 994,82  |
| 40                | 16                    | 62,39                       | 18,61                                        | 42,55                                        | 15,10  | 13,09  | 1,29                   | 879,89  |
| 60                | 15                    | 59,02                       | 16,75                                        | 42,08                                        | 14,70  | 13,98  | 1,21                   | 828,47  |

Установленным фактам можно дать следующее объяснение. В процессе жидкостного алитирования деталей из конструкционных углеродистых сталей на их поверхностях образуются горячие алюминиевые диффузионные покрытия, наружные слои которых состоят из алюминия, а внутренние – из алюминия и железа, содержание которого увеличивается по мере удаления от границ с наружными слоями вглубь детали. Причем на деталях из сталей с меньшим содержанием углерода формируются более толстые покрытия с повышенной толщиной внутренних слоев, что, вероятно, объясняется отрицательным влиянием углерода на скорость диффузии алюминия в алитируемой стали.

В процессе дальнейшего оксидирования формирование ТА- и МДО-покрытий происходит в результате частичного окисления горячих алюминиевых покрытий. Изначально окисляется только алюминий внешних слоев горячих алюминиевых покрытий, поэтому ТА- и МДО-покрытия формируются достаточно быстро и имеют равномерную качественную структуру. По мере увеличения длительности оксидирования ТА- и МДО-покрытия распространяются вглубь горячих алюминиевых покрытий, при этом в зоны окисления попадает железо, содержащееся во внутренних слоях горячих алюминиевых покрытий, что вызывает значимое снижение скорости роста ТА- и МДО-покрытий и нарушение их структуры. Причем на деталях из сталей с меньшим содержанием углерода формируются ТА- и МДО-покрытия большей толщины, что, по-видимому, объясняется более поздним попаданием железа в зоны окисления за счет более толстых наружных и внутренних слоев горячих алюминиевых покрытий.

На одинаковых алитированных поверхностях стальных деталей методами ТА и МДО формируются разные ТА- и МДО-покрытия, что хорошо согласуется с результатами ранее проведенных исследований [5]. При этом МДО-покрытия имеют большую толщину, что также подтверждает ранее полученные результаты, согласно которым при одинаковом объеме окисляемого алюминия объем формируемого МДО-покрытия превышает объем формируемого ТА-

покрытия [2]. Это можно объяснить тем, что МДО-покрытия отличаются от ТА-покрытий не только поликристаллической структурой, но и сочетанием более высокой пористости и более высокого содержания гидроксидов алюминия, а также соединений элементов раствора электролита и материала основы. Вместе с тем, МДО-покрытия формируются быстрее и поэтому меньше подвержены растворяющему действию со стороны раствора электролита.

ТА-покрытия, формируемые на алитированных поверхностях стальных деталей, мало отличаются от ТА-покрытий, формируемых на поверхностях деталей из алюминия и его сплавов, имеют примерно такие же структуру и свойства. МДО-покрытия, формируемые на алитированных поверхностях стальных деталей, по структуре и свойствам похожи на МДО-покрытия, формируемые на поверхностях деталей из алюминия и его сплавов, но существенно уступают им по максимальным значениям толщины, содержания кристаллических модификаций оксида алюминия, механическим и электрофизическим свойствам. Это объясняется тем, что небольшая толщина окисляемого алюминиевого слоя горячего алюминиевого покрытия не дает возможности формирования достаточно толстого МДО-покрытия, а это, в свою очередь, не дает возможности стабилизации мощных микродуговых разрядов, обеспечивающих устойчивое образование в МДО-покрытии модификаций кристаллического оксида алюминия и, особенно, самой твердой фазы –  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

В заключение необходимо отметить, что для формирования методами жидкостного алитирования и анодного оксидирования на поверхностях деталей из конструкционных углеродистых сплавов ТА- и МДО-покрытий с повышенными механическими и электрофизическими свойствами представляются перспективными, как минимум, два пути. Первый заключается в увеличении толщины слоев горячих алюминиевых покрытий, состоящих из алюминия, второй – в повышении толщины и улучшении структуры ТА- и МДО-покрытий на основе применения известных разработок [3, 4, 6].

По результатам представленной разработки подана заявка на получение патента РФ на изобретение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябов В.Р. Алитирование стали. – М. : Металлургия, 1973. – 240 с.
2. Чуфистов О.Е. Изменение геометрических размеров изделий из алюминиевых сплавов в процессе обработки анодным оксидированием // Практика противокоррозионной защиты. – 2006. – № 3(41). – С. 49–53.
3. Чуфистов О.Е., Борисков Д.Е., Чуфистов Е.А. Микродуговое оксидирование деталей из алюминиевых сплавов с генерацией синглетного кислорода вблизи оксидируемых поверхностей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 11. – С. 16–20.
4. Чуфистов О.Е., Демин С.Б., Чуфистов Е.А., Борисков Д.Е. Применение кислородного барботирования электролита в процессе микродугового оксидирования деталей из алюминиевых сплавов // Практика противокоррозионной защиты. – 2008. – № 1(47). – С. 42–48.
5. Чуфистов О.Е., Чуфистов Е.А., Артемьев В.П. Технология, строение и свойства покрытий, формируемых методами анодного оксидирования на алюминии и его сплавах // Цветные металлы. – 2009. – № 10. – С. 57–61.
6. Чуфистов О.Е., Чуфистов Е.А., Демин С.Б. Микродуговое оксидирование деталей из алюминиевых сплавов в растворах с мелкодисперсным корундом // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – № 1. – С. 16–21.

УДК 504.05

# ТЕХНОЛОГИЯ УТИЛИЗАЦИИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА

© *А.Н. Расстегаев, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *В.В. Голубовский, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

## TECHNOLOGY OF UTILIZATION OF OILY WASTE BY PYROLYSIS

© *A.N. Rasstegaev, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *V.V. Golubovskii, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

Предложена установка для утилизации нефтесодержащих отходов методом пиролиза с камерой дожигания в установке холодной плазмы, рассмотрен принцип ее действия. Показано, что зольный остаток в своем составе не содержит экологически опасных соединений, а в отходящих дымовых газах концентрация опасных веществ не превышает норм ПДК в рабочей зоне.

**Ключевые слова:** твердые отходы, установка, утилизация, пиролиз, холодная плазма.

Installation for solid waste by pyrolysis with an afterburner to install a cold plasma is proposed. It has been shown that ash waste product in its composition does not contain environmentally hazardous compounds, and in flue gases the concentration of harmful substances does not exceed standards PDK.

**Key words:** solid waste, installation, recycling, pyrolysis, cold plasma.

Развитие современного машиностроения и промышленности в целом влечет за собой все большее потребление энергии, основным источником которой является газ, нефть и продукты их переработки

В связи с этим встал остро вопрос утилизации и обезвреживания отходов добычи нефти, производства и отработанных нефтепродуктов, так как широко применяемые до сих пор способы захоронения их на полигонах с последующим разложением (или сжиганием) приводят не только к отторжению земель из хозяйственного оборота, но и к загрязнению атмосферы и гидросферы.

К настоящему времени разработан ряд технологий, основанных на термическом методе утилизации отходов: сжигание в печах с кипящим слоем, циклонных топках, барабанных и многоподовых печах, камерных печах, установках слоевого сжигания, барабанных печах и другие [1–7].

Одним из самых эффективных и безопасных методов является пиролиз, т.е. процесс деструктивного разложения органических соединений под действием высокой температуры. Пиролиз подразделяется на два основных типа: «сухой», то есть без доступа кислорода (или другого окислителя) и «окислительный», с незначительным доступом кислорода (другого окислителя). В свою очередь сухой пиролиз подразделяется на низкотемпературный (до 450 °C), среднетемпературный (500–800 °C), и высокотемпературный (более 900 °C) [4–7].

В данной работе рассматривается технология утилизации твердых отходов методом сухого пиролиза на опытной установке разложения твердых отходов, разработанной в рамках федеральной целевой программы «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009–2014)». Отличительной особенностью установки является трехступенчатая очистка образующейся газовой смеси (рисунок 1).

Камера термического разложения помещена в теплоизолированную обогревательную камеру, в нижней части которой установлена горелка разогрева и колосниковая решетка для дожига коксозольного остатка. Камера снабжена загрузочным и перемешивающим устройствами.

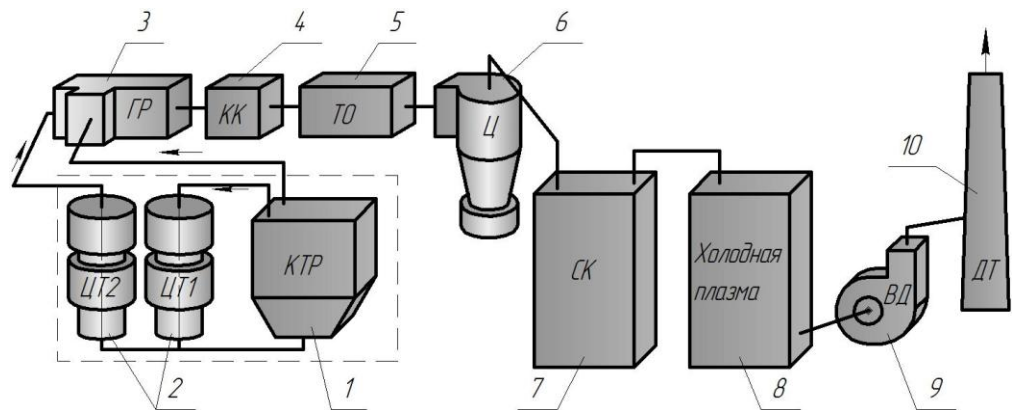


Рисунок 1 – Технологическая схема установки утилизации твердых отходов методом сухого пиролиза: 1 – камеры термического разложения; 2 – циклонных топок; 3 – газораспределителя; 4 – картриджа катализатора; 5 – теплообменника; 6 – циклона сухой очистки; 7 – скруббера; 8 – установки холодной плазмы; 9 – вентилятора-дымососа; 10 – дымовой трубы

Технологический процесс работы установки включает в себя следующие этапы:

1. *Подготовительный этап.* На этом этапе проверяются узлы на наличие внешних дефектов, работу электрических систем установки, производится очистка установки, настройка автоматики, а также заправка топливом и другими техническими жидкостями.

2. *Рабочий режим.* Производится запуск систем, разогрев установки до температуры начала процесса пиролиза, загрузка партии отходов, контроль параметров ведения процесса. Управление параметрами установки может осуществляться как в ручном, так и в автоматическом режиме. Основными контролируемыми параметрами являются:

- температура в камере термического разложения,
- температура отходящих газов,
- разряжение в камере термического разложения.

3. *Штатный останов.* Производится по завершению работы установки. На этом этапе производится отключение электрических систем установки, выгрузка коксозольного остатка, продувка систем очистки пиролизного газа.

Запуск установки осуществляется с розжига двух горелок, одна из которых находится в обогревательной камере, вторая в циклонной топке. Горелка, расположенная в циклонной топке, предназначена для дожига содержащихся в пиролизном газе горючих веществ. При достижении температуры в обогревательной камере реактора от 650 до 700 °С через загрузочное устройство сбрасывается порция отходов. В процессе пиролиза образовавшийся поток дымовых газов может быть направлен через циклонную топку (для дожига синтез-газа) либо через байпас в теплообменник. Технологически циклонная топка и обогревательная камера соединены между собой, поэтому часть тепла, выделяемая при дожиге синтез-газа, идет на поддержание температуры в обогревательной камере. По мере выполнения технологического процесса производится выгрузка на колосники коксозольного остатка из камеры термического разложения, а также загрузка следующей порции отходов. При необходимости можно производить несколько загрузок отходов, не выгружая коксозольный остаток на колосники.

Выделяемый в процессе утилизации пиролизный газ проходит несколько ступеней очистки. Сначала газ проходит через картридж катализатора 4, где отсеиваются крупные частицы золы, взвешенные в потоке пиролизного газа.

Прошедший первую ступень очистки газ поступает в теплообменник, где происходит его охлаждение, затем он поступает в циклон сухой очистки 6 и из него в скруббер 7. Завершающим этапом очистки является установка холодной плазмы 8, где мельчайшие частицы пыли, не отсеянные раньше, удаляются под действием низкотемпературной плазмы, генерируемой импульсным коронным разрядом, с наложенным на нее постоянным электрическим полем. Разряжение в камере термического разложения обеспечивает вентилятор-дымосос 9, последовательно соединенный с предыдущими ступенями очистки. Очищенный газ через дымовую трубу 10 выбрасывается в атмосферу.

По завершению работы с колосников собирается коксозольный остаток, который можно использовать, например, в строительной промышленности в качестве наполнителя для бетонных смесей.

К преимуществам установки можно отнести:

- возможность переработки практически любых видов твердых отходов без предварительной сортировки;
- малое число обслуживающего персонала (2 оператора);
- возможность ведения работ в непрерывном цикле;
- мобильность – установка имеет возможность размещения на универсальном автотракторном прицепе.

Предварительные испытания установки при переработке песка, загрязненного маслами, показали ее эффективность. Биологическая экспертиза коксозольного остатка показала безопасность продуктов переработки песка, загрязненного маслами, на данной установке. Газовый анализ подтвердил, что в отходящих дымовых газах концентрация опасных веществ не превышает норм ПДК в рабочей зоне.

Дальнейшим развитием установок такого типа может быть добавление модуля по сбору выделяемого в процессе пиролиза синтез-газа и использование его для получения топлива, которое можно будет применять для энергообеспечения самой установки, тем самым утилизация станет не затратным, а отчасти самокупаемым процессом, благоприятно влияющим на окружающую среду.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гонопольский А.М. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Инженерная защита окружающих территорий мегаполиса : Учебное пособие. – М. : МГУИЭ, 2004. – 368 с.
2. Гонопольский А.М. Обезвреживание твердых органических отходов : Учебное пособие / А.М. Гонопольский, В.Е. Мурашов. – М. : МГУИЭ, 2012. – 422 с.
3. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 3 – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 1024 с.
4. Янковой Д.С. Термическая деструкция отходов / Д.С. Янковой, К.В. Ладыгин, С.И. Стомпель [и др.] // Экология производства. – 2013. – № 12. – С. 38–41.
5. Бернадинер И.М. Обезвреживание опасных отходов: Выбор оптимальной технологии / И.М. Бернадинер, М.Н. Бернадинер // Твердые бытовые отходы. – 2010 г. – № 9.
6. Бернадинер И.М. Высокотемпературная переработка и обезвреживание жидких, пастообразных и твердых промышленных и медицинских отходов / И.М. Бернадинер, М.Н. Бернадинер // Экология и промышленность России. – 2011. – № 4.
7. Бернадинер М.Н., Шурыгин А.П. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. – М. : Химия, 1990.

УДК 620.193.42

**АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ШНЕКОВОГО РАСТВОРИТЕЛЯ  
В ПРОЦЕССЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СИЛЬВИНИТА**

© *А.С. Паличева, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *К.Р. Таранцева, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

**ANALYSIS OF THE REASON DESTRUCTION AUGER SOLVENT  
IN THE PROCESSES OF LEACHING OF SYLVITE**

© *A.S. Palicheva, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *K.R. Tarantseva, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

Проанализированы причины разрушения шнекового растворителя в процессе выщелачивания сильвинита. Показано, что разрушение аппарата произошло из-за модернизации технологической схемы, приведшей к замене схемы, процесса идеального вытеснения на идеальное смешение.

**Ключевые слова:** процесс, технология, разрушение, схема.

The reasons destruction of apparatus in process of sylvite leaching is analyzed.

It is shown that the destruction of the apparatus occurred due to the modernization of the technological scheme that led to the replacement the scheme of ideal displacement process on the scheme of perfect blending process.

**Key words:** process technology, the destruction, the scheme.

Шнековый растворитель с элеватором обезвоживающим относится к категории аппаратов непрерывного действия с перемешивающим устройством. Данный тип аппаратов используется в галургическом способе производства калийных удобрений. Способ основан на процессе выщелачивания – извлечения растворимого вещества из твердого материала с помощью жидкого растворителя. При этом процесс разделения происходит в системе жидкость – твердое тело.

В трехступенчатой прямоточной схеме выщелачивания растворение руды происходит в двух аппаратах. Аппараты работают по схеме прямотоков и установлены последовательно. Сильвинитовая руда загружается в первый растворитель, в котором происходит ее нагрев до температуры растворения при помощи маточного щелока. После этого руда поступает во второй растворитель, предназначенный для окончательного растворения щелоком, температура которого превышает 100 °С. На первом и втором этапах растворения процесс протекает при параллельном токе. Остаток из второго растворителя выгружается элеватором в аппарат со шнековой мешалкой, предназначенный для рекуперации тепла галитового отвала.

Шнековый растворитель состоит из сварного корпуса 1 корытообразной формы с ротором 2 и наклонным элеватором 4, предназначенным для выгрузки нерастворившейся твердой фазы (рисунок 1). Корпус аппарата состоит из отдельных частей, стыкуемых на месте монтажа сваркой. Один торец имеет глухую торцевую стенку, а второй со стороны, противоположной приводу мешалки, имеет карман, предназначенный для перегрузки отвала в элеватор.

Корпус аппарата снабжен съемной крышкой, состоящей из нескольких секций, в которых предусмотрены люки-лазы для обслуживания и ремонта. Внутри корпус разделен вертикальными перегородками, которые служат для изменения потока жидкости и для увеличения времени контакта продукта. Одновременно перегородки служат для жесткости корпуса.

Внутри корпуса на всю длину проходит горизонтальный ротор, который состоит из нескольких секций и цапф. Секции между собой и цапфами соединены с помощью фланцевых разъемов. Секции ротора представляют собой вращающийся вал с насаженными на него крестовинами, соединенными горизонтальными и винтовыми лопастями. Уплотнение вала ротора в корпусе растворителя – сальниковое. Привод перемешивающего устройства осуществляется от электродвигателя через редуктор и клиноременную передачу. Соединение редуктора и вала ротора производится посредством муфты с эластичными элементами.

В конце аппарата по ходу потока установлен наклонный обезвоживающий элеватор, смонтированный как целое с корпусом и предназначенный для обезвоживания и выгрузки нерастворенного остатка.

Элеватор представляет собой сварной корпус коробчатой формы (прямоугольной) с вмонтированными барабаном ведомым (в нижнем кармане) и валом приводным (в верхней секции), на которых установлена ковшовая цепь.

Цепь состоит из пластинчатых звеньев, скрепленных между собой осями, на которых крепятся ковши корытообразной формы. Корыто и установленные внутри него перегородки перфорированы. Привод ковшовой цепи осуществляется от электродвигателя через редуктор и приводной барабан. Соединение редуктора и приводного вала – посредством муфты с эластичными элементами.

Для упорядоченного движения цепи в шахте элеватора предусмотрены опорные и съемные направляющие.

Верхняя секция корпуса элеватора снабжена устройством для выгрузки, люками и штуцером для отвода паров. Натяжение ковшевой цепи элеватора производится при помощи гидростоек, установленных под поворотной платформой привода.

Твердая фаза и растворяющая жидкость (маточный щелок) непрерывно поступают в корпус аппарата через штуцеры входа продукта, а раствор отводится через сливной карман и штуцер слива продукта с противоположного конца корпуса растворителя. Твердый материал перемещается вдоль корпуса аппарата винтовыми лопастями ротора, жидкость движется в том же направлении. Нерастворившийся остаток поступает в карман наклонного элеватора, откуда перфорированными ковшами выгружается в следующий растворитель или отвал.

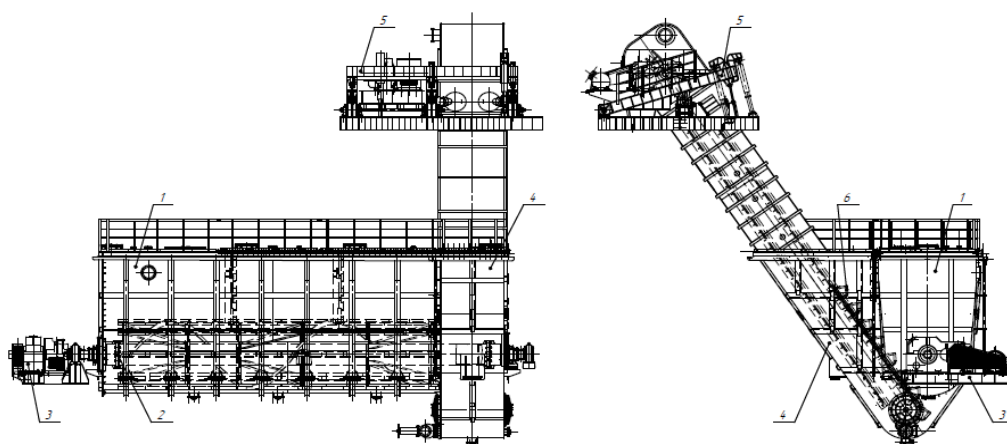


Рисунок 1 – Шнековый растворитель с элеватором: 1 – корпус шнековой мешалки с крышкой, 2 – ротор, 3 – привод шнековой мешалки, 4 – элеватор обезвоживающий, 5 – станция приводная левого исполнения, 6 – цепь ковшовая элеватора

Расчетами, проведенными на этапе строительства, заложены следующие габаритные размеры устройства. Аппарат: длина 30 500 мм; ширина 5700 мм; высота 5990 мм. Элеватор: длина 13 800 мм; ширина 7250 мм; высота 17 585 мм.

Для изготовления узлов и деталей, контактирующих с рабочей средой, использована сталь марки 08Х21Н6М2Т (ЭП-54) как наиболее стойкая в данной среде (по сравнению со сталями марок 12Х18Н10Т и 10Х17Н13М2Т) и рекомендованная организацией, эксплуатирующей оборудование и специализированными институтами (ЗАО ВНИИ «Галургии», ПАО «УкрНИИхиммаш»).

В 2011 г. в технологической схеме по решению эксплуатирующей организации длина аппарата была уменьшена на 9000 мм и составила 21 500 мм. При этом все остальные параметры, в том числе и параметры технологического процесса, остались прежними. Согласно технологическим расчетам, процесс в модернизированном аппарате должен был протекать при противотоке. Для обеспечения прежней производительности 800 т/ч по твердой фазе отвала аппарат заполняли рабочей средой практически под крышку (ниже уровня крышки примерно на 300 мм).

#### *Характеристика рабочей среды аппарата*

Исходным сырьем, поступающим в аппарат, является суспензия галитового отвала и водного раствора солей хлористого калия, натрия, магния и кальция с температурой до +105 °С.

Характеристика галитового отвала:

массовая доля воды – 8 ÷ 14 %;

химический состав твердой фазы:

KCl – до 3,1 %;

NaCl – до 95 %;

Ca<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + нерастворимый остаток до 2,0 %.

Гранулометрический состав указан в таблице 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав галитового отвала в аппарате

| Крупность фракции, мм | Массовая доля, % |
|-----------------------|------------------|
| + 5                   | 7,1 ÷ 12,6       |
| + 2,5                 | 14,1 ÷ 20,0      |
| + 1,0                 | 25,4 ÷ 38,3      |
| - 1,0                 | 33,3 ÷ 47,8      |
| + 0,5                 | 17,3 ÷ 22,3      |
| + 0,125               | 13,2 ÷ 25,9      |
| - 0,125               | 1,4 ÷ 3,0        |

Характеристика жидкой фазы:

температура до 105 °С;

плотность 1250 ÷ 1255 кг/м<sup>3</sup>;

вязкость (при 1000 °С) 0,6 ÷ 1,0·10<sup>3</sup> Па·с;

водородный показатель среды 7 РН ;

температура кипения 107 °С.

Химический состав:

KCl – до 17 %;

NaCl – до 17 %;

MgCl<sub>2</sub> + CaCl<sub>2</sub> до 4,0 %;



вода 62÷65 %.

Характеристика охлаждающих потоков:

маточный щелок:

температура 28 ÷ 42 °С;

плотность 1230 ÷ 1245 кг/м<sup>3</sup>;

KCl 9,5 ÷ 13,5 %;

NaCl 17 ÷ 19 %;

MgCl<sub>2</sub> + CaCl<sub>2</sub> до 4,0 %;

нерастворимый остаток до 150 мг/м<sup>3</sup>;

вода 70 ÷ 64 %;

фильтрат:

KCl 8 ÷ 17 %;

NaCl 9 ÷ 24 %;

MgCl<sub>2</sub> + CaCl<sub>2</sub> 1,9 ÷ 4,0 %;

температура до 65 ± 5 °С;

рассол:

температура -5 ÷ +40 °С;

плотность 1160 ÷ 1190 кг/м<sup>3</sup>;

KCl – 6 ÷ 9 %;

CaCl<sub>2</sub> 10 ÷ 15 %;

MgCl<sub>2</sub> + CaCl<sub>2</sub> до 2,0 %;

вода 82 ÷ 75 %.

*Характеристика рабочей среды элеватора*

Исходным сырьем, поступающим в элеватор, является суспензия галитового отвала и водного раствора солей хлористого калия, натрия, магния и кальция с температурой до 80 °С.

Характеристика обезвоженного галитового отвала:

массовая доля воды 8 ÷ 14 %;

химический состав твердой фазы:

KCl 1,85 ÷ 10,0 %;

NaCl 97,15 ÷ 87,4 %;

Ca<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,24 ÷ 0,51 %;

нерастворимый остаток 0,74 ÷ 2,09 %.

Гранулометрический состав указан в таблице 2.

Таблица 2

Гранулометрический состав галитового отвала в элеваторе

| Крупность фракции, мм | Массовая доля, % |
|-----------------------|------------------|
| + 5                   | 7,1 ÷ 12,6       |
| + 2,5                 | 14,1 ÷ 20,0      |
| + 1,0                 | 25,4 ÷ 38,3      |
| - 1,0                 | 33,3 ÷ 47,8      |
| + 0,5                 | 17,3 ÷ 22,3      |
| + 0,125               | 13,2 ÷ 25,9      |
| - 0,125               | 1,4 ÷ 3,0        |

Характеристика жидкой фазы:

температура до 60 ÷ 80 °С;

плотность 1220 ÷ 1240 кг/м<sup>3</sup>;

вязкость (при 100 °С) – около 1,5·1,0·10<sup>3</sup> Па·с;

водородный показатель среды 7 РН.

Химический состав:

KCl – 7,93 ÷ 16,6 %;

NaCl 9,02 ÷ 24,6 %;

MgCl<sub>2</sub> 0,9 ÷ 1,92 %;

CaCl<sub>2</sub> 1,0 ÷ 2,03 %;

остальное вода.

Исследуемый модернизированный аппарат со шнековой мешалкой и элеватором был введен в эксплуатацию в марте 2012 г. В мае 2012 г. (через три месяца эксплуатации) во время плановой остановки аппарата были отмечены обширные участки коррозии на поверхности узлов и деталей, контактирующих с рабочей средой, а в октябре 2013 года аппарат выведен из строя, так как скорость коррозии превысила предельно допустимый для данного типа стали показатель (рисунок 2).

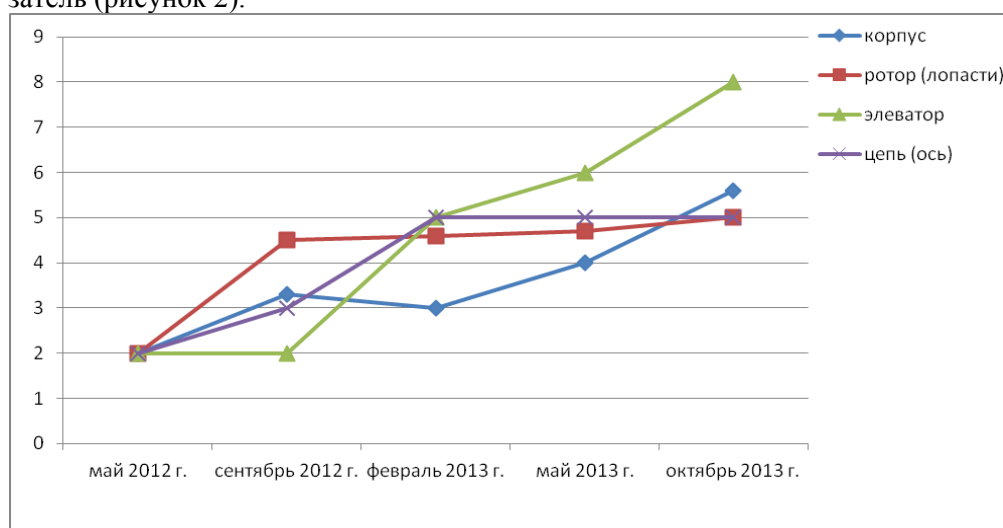


Рисунок 2 – Глубина коррозионных повреждений (мм) узлов и стен аппарата

Анализ причин выхода аппарата из строя показал следующее.

Аппарат изготовлен в полном соответствии с требованиями технического задания, требованиями нормативных документов и ГОСТ Р 52630-2006 по согласованной технической документации.

Качество примененного металла 08X21H6M2T подтверждено сертификатами соответствия завода-изготовителя, протоколами испытаний на МКК и проведенными исследованиями.

Химический анализ металла вырезанного фрагмента мешалки показал, что металл соответствует аустенитно-ферритной стали 08X21H6M2T ГОСТ5632-72.

На заводе-изготовителе проводился входной контроль листового проката в части проверки химического состава и стойкости к МКК по листно и каждой тяги сортового проката.

Поскольку ранее, до модернизации аппарата, сталь марки 08X21H6M2T успешно зарекомендовала себя в данном производстве, и случаев интенсивного коррозионного разрушения аппаратов не выявлено, причиной выхода данного аппарата из строя, по-видимому, является изменение его конструкции.

Как было указано выше, для обеспечения заданной производительности аппарат заполнялся рабочей средой практически под крышку. При подобном уровне заполнения мешалки в пространстве между крышкой и средой возникает

насыщенная паро-воздушная смесь, интенсифицирующая процессы коррозионного разрушения:

- в первой секции аппарата коррозия наблюдается практически по всей высоте секции (кольцом) в зоне штуцера входа продукта А;
- во второй секции коррозия идет в основном вдоль средней оси ротора;
- в третьей секции коррозия наблюдается и особо интенсивна в зоне выхода продукта (карман сливной) – штуцер Б.

Для предотвращения перенасыщения кислородом рабочей среды штуцер выхода продукта располагался в первой секции мешалки аппарата, расстояние от оси загрузки до оси выгрузки вправо составляло 1410 мм.

Однако без согласования с заводом-изготовителем штуцер выхода продукта Б при монтаже был перемещен в третью секцию, смещение штуцера влево по корпусу составило  $\approx 8600$  мм, что способствовало еще большему коррозионному разрушению.

Однако главной причиной, спровоцировавшей ускоренное разрушение аппарата, явилась его модернизация. Уменьшение длины аппарата с 30 500 до 21 500 мм без изменения его ширины и высоты привело к замене схемы прямотока (процесс идеального вытеснения продукта) на схему противотока (процесс идеального смешения) [1]. Интенсивный процесс перемешивания твердой и жидкой фазы, эрозионное и коррозионное воздействие реакционной среды [2–4] привели к невозможности формирования пассивной пленки на поверхности аппарата и к выходу его из строя.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Плановский А.Н., Николаев П.И. *Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии*. – М. : Химия, 1987. – 492 с.
2. Колотыркин Я.М. *Металл и коррозия*. – М. : Металлургия, 1985.
3. Пахомов В.С. *Коррозия металлов и сплавов*. – М. : Наука и технологии, 2013.
4. Таранцева К.Р., Пахомов В.С. Влияние движения среды и температуры на потенциал образования солевой пленки // *Защита металлов*. – 1999. – Т. 35, № 2. – С. 162–168.

УДК 681.32

### ОБРАБОТКА НЕЧЕТКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЗАПРОСОВ К КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ БАЗЕ ДАННЫХ

© *М.Ю. Бабич*, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© *В.Е. Кузнецов*, ОАО «Научно-производственное предприятие “Рубин”»  
(г. Пенза, Россия)

### HANDLING OF INDISTINCT INFORMATION DEMANDS TO A CARTOGRAPHICAL DATA BASE

© *M.Uy. Babich*, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© *B.E. Kuznezov*, JSC "NPP"Rubin"(Penza, Russia)

Решение задач представления запросов в картографические базы данных часто носят приближенный характер и связан с обработкой нечетких переменных. При этом, в запросе присутствуют нечеткие объекты, которые требуют расширения базы картографических данных. В статье рассмотрены три основных примитива, которые лежат в основе любой электронной карты. Это точечный, линейный и площадной (полигональный) примитивы. Каждому традиционному примитиву сопоставлен нечеткий примитив. Показано, что кроме геоинформационных систем теория нечетких множеств используется при анализе данных позиционирования от различных источников – GPS или ГЛОНАСС-приемники, РЛС и т.д.

**Ключевые слова:** нечеткие множества, электронная карта, картографический объект

Solving problems in the presentation of requests cartographic databases often are approximate and is associated with the processing of fuzzy variables. In this case, the query contains fuzzy objects that require broadening the base map data. The article discusses three main primitives that underlie any electronic card. This point, linear and areal (polygon) primitives. Each primitive is mapped to the traditional fuzzy primitive. It is shown that in addition to geographic information systems fuzzy set theory is used to analyze the position data from different sources – GPS and GLONASS receivers, radar, etc.

**Key words:** fuzzy sets, electronic map, a cartographic object

В настоящее время благодаря развитию компьютерной картографии увеличивается число пользователей, использующих в своей работе картографические данные [1]. Решение задач в подобных случаях часто носит достаточно приближенный характер и связан с обработкой нечетких переменных. Например, рассмотрим запрос к базе картографических данных в процессе решения задачи, определяющей последствия паводка: «Найти объект, расположенный вблизи границы возможного затопления». Сам запрос является нечетким, так как заданный параметр «вблизи» является нечеткой лингвистической переменной. Кроме того, в запросе присутствует нечеткий объект «граница затопления», который должен каким-то образом храниться в картографической базе данных. Здесь под «границей затопления» понимается размытая и динамически меняющаяся ломаная, которая не может быть задана обычным набором координат. Таким образом, кроме реализации нечетких запросов возникает необходимость расширения базы картографических данных за счет увеличения числа точек координат, описывающих местоположение объекта, и значений характеристической функции, относящихся к точкам нечетких объектов.

Рассмотрим три основных примитива, которые, как известно, лежат в основе любой электронной карты. Это точечный, линейный и площадной (полигональный) примитивы. Каждому традиционному примитиву сопоставим нечеткий примитив.

*Точечный примитив.* Описывается в картографической базе данных координатами одной точки  $p_0 = (x_0, y_0)$ .

Рассмотрим множество точек  $U(p_0)_r$ , являющееся окрестностью точки  $(x_0, y_0)$  с некоторым радиусом  $r$ . Зададим характеристическую функцию  $\mu(x, y)$ , зависящую от координат точек множества  $U(p_0)_r$ . Здесь  $x, y$  – координаты точек, принадлежащих множеству  $U(p_0)_r$ . Чем ближе расположена точка  $p$  из  $U(p_0)_r$  к точке с координатами  $(x_0, y_0)$ , тем больше значение  $\mu(x, y)$ . Максимум функции достигается в точке  $p_0$ . Если предположить, что  $\mu(x, y) = 0$  для любой точки  $p$ , не принадлежащей  $U(p_0)_r$ , то можно рассматривать некоторое множество  $U(p_0)$ , не зависящее от радиуса  $r$ . За нечеткий точечный примитив будем принимать полученное нечеткое множество  $U(p_0)$ . При условии, что  $\mu(x, y) = 0$  для любых точек отличных от  $p_0$  и  $\mu(x_0, y_0) = 1$ , выполняется принцип соответствия, то есть менее общее определение является частным случаем более общего: обычный точечный примитив является частным случаем нечеткого точечного примитива.

*Линейный примитив.* Описывается последовательностью пар координат четких точек  $\{p_i\}$ , являющихся узлами ломаной. Здесь  $p_i = (x_i, y_i)$ .

Рассмотрим последовательность нечетких точек  $\{p_i\}$ . Соединим ядра нечетких точек, то есть точки, для которых  $\mu(x, y) = 1$ . Получим обычную ломаную линию. Произведем фазификацию следующим образом. Определим для каждой четкой точки ломаной линии характеристическую функцию соответствующей нечеткой точки и перейдем от четких точек ломаной к нечетким точкам. Каждой нечеткой точке будет соответствовать множество  $U(p_s)$ . Далее выполним объединение нечетких множеств по правилу

$$\mu_L(x, y) = \max \mu_{U(p_s)}(x, y). \quad (1)$$

Полученное нечеткое множество  $L = \cup U(p_s)$  будем называть нечетким линейным примитивом.

*Площадной примитив.* Описывается последовательностью пар координат четких точек  $\{p_i\}$ , являющихся узлами ломаной. Причем первая и последняя точка ломаной совпадают. Такая ломаная линия является границей площадного примитива. Произведем фазификацию следующим образом. Множество внутренних и граничных точек площадного примитива представим как нечеткое множество  $V$  с характеристической функцией  $\mu_V(x, y)$ , для которой выполняются следующие условия:  $\mu_V(x, y) = 1$  для любой внутренней и граничной точки и  $\mu_V(x, y) = 0$  для любой внешней точки. Вместо четкой граничной ломаной линии рассмотрим нечеткую ломаную линию  $L$  с характеристической функцией  $\mu_L(x, y)$ . Выполним объединение двух нечетких множеств  $V$  и  $L$  по правилу:

$$\mu_W(x, y) = \max (\mu_V(x, y), \mu_L(x, y)). \quad (2)$$

Полученное нечеткое множество  $W$  будем называть нечетким площадным примитивом.

Нечетким образом определены все три основные картографические примитивы. Однако в нечетких запросах важное значение имеет выбранная метрика, определяющая степень «близости» найденных данных к запрашиваемым. Роль метрики в геометрических данных играет расстояние между объектами. Однако рассмотрение нечетких картографических объектов требует для них уточнения понятия метрики.

Введем метрику  $\rho^H$  для нечетких площадных объектов. Метрики для точечных и площадных объектов можно ввести аналогично.

Разобьем нечеткое множество  $W^A$  площадного объекта  $A$  на непересекающиеся подмножества  $W_i^A$ , для которых выполняется следующее свойство: для любой точки  $p \in W_i^A$  имеем  $\mu(p) = C_i^A$ , где  $C_i^A$  – некоторая константа, соответствующая множеству  $W_i^A$ . Заметим, что по определению  $W_i^A \cap W_j^A = \emptyset$ . В общем случае множество всех  $W_i^A$  имеет мощность континуума. Аналогично разобьем площадной объект  $B$  на подмножества  $W_i^B$ .

Выберем для объектов  $A$  и  $B$  множества  $W_i^A$  и  $W_i^B$  с одинаковыми  $C_i^A$  и  $C_i^B$ , то есть  $C_i^A = C_i^B = C_i$ . Определим  $D_i$  как множество всех расстояний между четкими точками  $W_i^A$  и  $W_i^B$ . Пусть  $\rho_i = \min(x)$ , где  $x \in D_i$ , то есть  $\rho_i$  – минимальное расстояние между  $W_i^A$  и  $W_i^B$ . Множество всех таких  $\rho_i$  обозначим как  $R$ . Выполним фазификацию множества  $R$  следующим образом. На множестве  $R$  для каждого  $\rho_i$  введем характеристическую функцию  $\mu_R$ , где  $\mu_R(\rho_i) = C_i$ . Если  $\rho_i = \rho_j$  при  $i \neq j$ , выбираем  $\mu_R(\rho_i) = \mu_R(\rho_j) = \min(C_i, C_j)$ . Можно доказать, что  $\mu_R$  – непрерывная функция на множестве действительных чисел с областью изменения  $[0, 1]$ , то есть она удовлетворяет требованиям обычной характеристической функции.

За расстояние между нечеткими площадными объектами  $W_i^A$  и  $W_i^B$  примем  $\rho^H$ , полученную любым известным методом приведения к четности.

Например, центроидный метод:

$$\rho^H = (\int x \cdot \mu_R(x) dx) / (\int \mu_R(x) dx). \quad (3)$$

Здесь интеграл  $\int$  берется по множеству определения функции  $\mu_R$ . При получении  $\rho^H$  необходимо уточнить алгоритм получения метрики при пересечении нечетких площадных объектов. При их пересечении возможно два варианта:

- а) нечеткие множества  $W_i^A$  и  $W_i^B$  пересекаются, но граница  $W_i^B$  не находится к ядру  $W_i^A$  ближе, чем граница  $W_i^A$ ;
- б) нечеткие множества  $W_i^A$  и  $W_i^B$  пересекаются, и граница  $W_i^B$  находится к ядру  $W_i^A$  ближе, чем граница  $W_i^A$ .

В случае а)  $\rho_i = 0$  и, следовательно, такое пересечение не будет оказывать влияние на вычисление  $\rho^H$ . В случае в) можно  $\rho_i$  принимать за 0 либо брать с отрицательным знаком.

Заметим, что для введенной метрики аксиома  $\rho(x, y) \leq \rho(x, z) + \rho(z, y)$  выполняется при выполнении одного из двух следующих ограничений:

- 1) метрика определена только для непересекающихся нечетких точечных объектов с множеством точек нечеткого точечного объекта  $U(p_0)$ , являющегося окружностью;
- 2) метрика определена только для нечетких объектов, расстояние между которыми значительно превышает длины самих объектов.

Если условия 1) или 2) не выполняются, то не выполняется рассмотренная аксиома. В этом случае определенную  $\rho^H$  точнее назвать квазиметрикой. В нечетких запросах, как правило, сравнения, связанные с вычислением метрик, выполняются попарно и, следовательно, невыполнение рассмотренной аксиомы не влияет на результаты нечетких запросов к базе картографической информации.

Следует отметить, что существующие геоинформационные системы (ГИС) могут эффективно решать только некоторые проблемы, возникающие при обработке картографической информации в системах специального назначения. Например, остаются без эффективной информационной поддержки следующие вопросы:

- решение проблем взаимосвязи БД картографии и БД специализированных прикладных задач (БД АИС);
- применение специализированных картографических классификаторов типов объектов;
- поддержка данных позиционирования, поступающих от различных источников;
- реализация нечетких картографических объектов и нечеткой логики (нечеткая картография);
- решение топологических задач с использованием нечетких картографических объектов и другие.

Решение подобных вопросов возможно с помощью разработанной подсистемы пользовательских картографических слоев (ППКС), принципы реализации которой приведены в [1]. ППКС является системно-программной прослойкой между используемой открытой ГИС и разрабатываемой АИС специального назначения, и именно она берет на себя решение указанных ранее вопросов с использованием возможностей ГИС.

Так, ППКС обеспечивает системную увязку пользовательских задач и взаимосвязь специфических БД ГИС и БД АИС, что дает возможность прикладным задачам не учитывать возможности применяемой ГИС. Таким образом, использование ППКС не привязывает весь комплекс программ АИС к одной выбранной ГИС, а это позволяет, в свою очередь, осуществить выбор ГИС по цене и качеству в соответствии с требованиями конкретного проекта. Более того, замена ГИС может быть осуществлена даже после завершения проекта без внесения изменений в него.

Конечно, это возможно лишь в том случае, если в ППКС уже реализована поддержка ГИС, которую предполагается использовать. Поэтому одним из направлений развития ППКС является наращивание поддерживаемых ГИС (в настоящее время поддерживаются ГИС «Интеграция» и «MapInfo»). Также в ППКС реализована поддержка независимых от ГИС специализированных классификаторов типов объектов. Это позволяет создавать типы (шаблоны) объектов с помощью интерфейса, не зависящего от ГИС. В то же время данные шаблоны могут быть нанесены на ЭК различных форматов, открытых с использованием соответствующих ГИС (поддерживающих данный формат ЭК) в качестве сервера. Это возможно благодаря взаимодействию ППКС с ГИС на уровне простейших примитивов, являющихся основой любой ГИС.

Еще одной задачей, решаемой ППКС независимо от используемой ГИС, являются прием данных позиционирования от различных источников (*GPS* или ГЛОНАСС приемники, РЛС и т.д.) и визуализация местоположения и траекторий движения соответствующих объектов. Во многих современных ГИС данная возможность реализована, но ППКС, как и в случае с классификаторами, позволяет абстрагироваться от конкретной ГИС. Более того, использование собственного простого протокола передачи данных позиционирования между компонентами ППКС позволяет расширять набор поддерживаемых устройств и внешних протоколов обмена данными без изменения структуры как самой ППКС, так и построенной с ее использованием АИС. Следовательно, развитие ППКС возможно за счет расширения списка поддерживаемых устройств и протоколов передачи данных позиционирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабич М.Ю. Вопросы использования картографических данных в автоматизированных информационных системах // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2006. – №1. – С. 7–13.

УДК 681.32

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЧЕТКОГО РАССТОЯНИЯ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ  
ИНФОРМАЦИИ О НЕЧЕТКИХ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ**

© М.Ю. Бабич, Пензенский государственный технологический университет

(г. Пенза, Россия)

© Н.П. Бажутина, ООО «Прогрестех» (г. Москва, Россия)

**THE DEFINITION OF AN INDISTINCT DISTANCE IN THE TASKS  
TREATING AN INFORMATION ABOUT INDISTINCT  
CARTOGRAPHICAL PLANTS**

© M.Uy. Babich, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© N.P. Bazutina, CLL «Progresstech» (Moscow, Russia)

В статье рассмотрены вопросы определения расстояния между нечеткими точками, которые описывают нечеткие картографические объекты. При этом под нечетким расстоянием понимается нечеткое множество, характеризующее степень близости двух нечетких точек.

**Ключевые слова:** нечеткие множества, электронная карта, картографический объект.

In a paper the problems of the definition of a distance between indistinct points are considered which describe indistinct cartographical plants. Thus, indistinct distance is understood as an indistinct set describing a degree of proximity of two indistinct points.

**Key words:** indistinct sets, electronic map, cartographical plant.

Решение многих задач в проектируемых автоматизированных системах обработки информации (АСОИ) часто носит достаточно приближенный характер и связано с обработкой нечетких данных. Это касается и параметров объектов, наносимых на электронную карту (ЭК), тогда как в большинстве геоинформационных системах (ГИС) понятия нечетких картографических объектов не существует. Поэтому данная проблема является одним из перспективных направлений развития подсистем пользовательских картографических слоев (ППКС) [1]. В настоящее время в ППКС данная возможность также не реализована в полном объеме, но уже имеется возможность поиска объектов по значениям семантических характеристик объектов с использованием нечетких переменных. В связи с этим предполагается реализовать нечеткую картографию в рамках ППКС, что обеспечит поддержку нечетких картографических объектов на уровне АСОИ, но с использованием для отображения на ЭК четких объектов, поддерживаемых ГИС.

Таким образом, развитие ППКС необходимо проводить в двух основных направлениях:

- расширение списка поддерживаемых ГИС, устройств и протоколов передачи данных позиционирования;
- реализация новых функциональных возможностей. В частности, одним из перспективных направлений является обеспечение поддержки нечеткой картографии и решение на ее основе нечетких топологических задач.

Для определения нечеткого расстояния в задачах обработки информации о нечетких картографических объектах рассмотрим на плоскости  $Z$  некоторую окрестность  $U$  обычной точки. Введем характеристическую функцию принадлежности  $\mu(z)$  с множеством принадлежности  $[0, 1]$ . Рассмотрим нечеткое множество  $U^h$  универсального множества  $Z$ , соответствующее функции принадлежности  $\mu(z)$ . Так как каждая точка на плоскости определяется парой координат  $(x, y)$ , то  $\mu(z) = \mu(x, y)$ . Функция принадлежности  $\mu(x, y)$  определяет некоторое



нечеткое бинарное отношение  $R: (X, Y) \rightarrow [0, 1]$ . Хотя в некоторых случаях от функции принадлежности  $\mu(x, y)$  можно будет перейти к функции принадлежности  $\mu(r)$ , где  $r$  – обычное расстояние.

Введем следующие условия. Для любой точки  $(x, y)$ , принадлежащей  $U$ , выполняется:  $0 < \mu(x, y) \leq 1$ . Для любой точки  $(x, y)$ , не принадлежащей  $U$ , выполняется:  $\mu(x, y) = 0$ . Существует одна единственная точка  $(x_0, y_0)$ , принадлежащая  $U$ , в которой выполняется:

$$\mu(x_0, y_0) = \max \mu(x, y) = 1, \quad (1)$$

где  $(x, y)$  – любая точка, принадлежащая  $Z$ . Таким образом, область  $U$  является носителем нечеткого множества  $U^n$ . Нечеткое множество  $U^n$  *унимодально*.

Нечеткое множество  $U^n$  будем называть *нечетким точечным примитивом*. Картографический объект, в основе которого лежит нечеткий точечный примитив, будем называть нечетким точечным объектом.

Для решения прикладных задач, обрабатывающих данные нечетких картографических объектов, необходимо ввести аналог расстояния между нечеткими точками. Использовать обобщенное расстояние Хемминга или обобщенное евклидово расстояние нецелесообразно, так как в них не учитываются координаты точек нечетких объектов.

Введем следующие обозначения. Пусть  $U_1^n$  и  $U_2^n$  – две нечеткие точки с функциями принадлежности  $\mu_1(x, y)$  и  $\mu_2(x, y)$ , причем четкие точки  $p_1$  и  $p_2$  являются ядрами нечетких точек  $U_1^n$  и  $U_2^n$ . Пусть  $\rho$  – обычное расстояние между четкими точками. Введем понятие нечеткого расстояния между двумя нечеткими точками –  $\rho^n(U_1^n, U_2^n)$ . Под нечетким расстоянием будем понимать нечеткое множество, характеризующее степень близости двух нечетких точек. Расстояние между нечеткими точками можно определить тремя способами.

Первый способ. Проведем дефазификацию нечетких множеств  $U_1^n, U_2^n$ . В результате получим две четкие точки. За расстояние между нечеткими точками принимается расстояние между полученными после дефазификации четкими точками. В этом случае выполняются все три аксиомы расстояния, включая транзитивность. Однако пропадает само понятие нечеткого расстояния, и иногда бывает затруднена дефазификация произвольных нечетких множеств  $U_1^n, U_2^n$ .

Предположим, что ядра нечетких точек не совпадают, и также отсутствуют нечеткие области пересечения. Рассмотрим второй и третий способ определения нечеткого расстояния.

Второй способ. Выберем точки  $u_1 \in U_1$  и  $u_2 \in U_2$ . Определим расстояние  $\rho(u_1, u_2)$  между выбранными двумя точками. Сопоставим полученное расстояние со значением функции принадлежности  $\mu(\rho)$  в зависимости от значений  $\mu_1(u_1)$ ,  $\mu_2(u_2)$ . Вновь выберем точки из  $U_1$  и  $U_2$ , и т.д. Для всех пар точек универсального множества (плоскость  $Z$ ), в которых хотя бы одна точка не принадлежит области  $U_1$  или  $U_2$ , примем  $\mu(\rho) = 0$ . За нечеткое расстояние  $\rho^n$  примем нечеткое множество значений всех  $\rho$  с полученной функцией принадлежности  $\mu(\rho)$ .

Третий способ. Предположим, что функции принадлежности  $\mu_1(z)$ ,  $\mu_2(z)$  непрерывны. Для каждого значения  $w$  из полуинтервала  $(0, \min(\mu_1(p_1), \mu_2(p_2))]$  выберем точки из областей  $U_1$ ,  $U_2$ , для которых значения их функций принадлежности равны  $w$ . Так как функции  $\mu_1(z)$ ,  $\mu_2(z)$  непрерывны, то для каждого значения  $w$  такие точки существуют. Определим расстояние  $\rho$  между множеством выбранных таким образом точек из  $U_1$  и  $U_2$ . Сопоставим значение  $\rho$  со значением функции принадлежности  $\mu(\rho)$ , равным  $w$ . Получим множество значений  $\rho$ , для которых

$\mu(\rho) > 0$ . Для всех остальных  $\rho$  положим  $\mu(\rho) = 0$ . За нечеткое расстояние  $\rho^H$  примем нечеткое множество значений  $\rho$  с функцией принадлежности  $\mu(\rho)$ .

В случае совпадения ядер нечетких точек будем считать, что носитель нечеткого расстояния отсутствует, то есть для всех  $\rho$   $\mu(\rho) = 0$ . Если существует нечеткая область пересечения, которой можно пренебречь, нечеткая область пересечения не рассматривается. В противном случае ситуация не определена.

За величину, характеризующую нечеткое расстояние, полученное вторым и третьим способом, примем значение, полученное любым известным методом приведения к четности нечеткого множества  $\rho^H$ . Однако такая величина является всего лишь симметрикой, так как для нее не выполняется условие транзитивности. Заметим, что даже в случае непрерывных функций принадлежности для нечетких точек функция принадлежности нечеткого расстояния, полученная вторым и третьим способом, не обязательно непрерывна, а может иметь разрыв первого рода.

Второй способ получения нечеткого расстояния в отличие от третьего не требует условия непрерывности функций принадлежности  $\mu_1(z)$ ,  $\mu_2(z)$ . Однако если  $\mu_1(z)$  не совпадает с  $\mu_2(z)$ , то происходит определение расстояния между группами точек с различными значениями функций принадлежности, при том что существуют группы точек с равными значениями функций принадлежности.

Для третьего способа получения нечеткого расстояния вместо непрерывности функций  $\mu_1(z)$ ,  $\mu_2(z)$  можно потребовать совпадения их значений для групп точек. Это является разумным требованием, так как при создании новых нечетких картографических объектов пользователь может оперировать стандартными лингвистическими переменными при указании значения функции принадлежности для групп точек. Например, функции принадлежности могут убывать с разной скоростью, но проходить через последовательность одинаковых значений: «ядро», «много», «средне», «незначительно» и т.д.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бабич М.Ю. Вопросы использования картографических данных в автоматизированных информационных системах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 1. – С. 7–13.

УДК: 621.317

**ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ С ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНЫМ  
МОДУЛИРОВАННЫМ СИГНАЛОМ**

© *М.М. Бутаев, ОАО «Научно-производственное предприятие “Рубин”»  
(г. Пенза, Россия)*

© *Е.А. Данилов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)*

© *И.И. Сальников, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)*

**INFORMATION MODEL OF A RADAR-TRACKING ENGINEERING  
SYSTEM OF PROTECTION WITH THE LINEARLY-FREQUENT  
MODULATED SIGNAL**

© *M.M. Butaev, JSC "NPP"Rubin"(Penza, Russia)*

© *E.A. Danilov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *I.I. Salnikov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье выполнены оценки потенциальных возможностей радиолокационной технической системы охраны с линейно-частотным модулированным сигналом на основе определения информационного объема охраняемой зоны, модель которой представляет собой плоскость.

**Ключевые слова:** информационная модель, радиолокационная техническая система охраны, информационная емкость, разрешающая способность.

In a paper is carried out evaluations of potential possibilities of a radar-tracking engineering system of protection with the linearly-frequent modulated signal because of definitions of information volume of protected zone, which model represents a plane.

**Key words:** an information model, radar-tracking engineering system of protection, information capacity, resolving power.

Для оценки потенциальных возможностей радиолокационной технической системы охраны (РЛТСО) с линейно-частотным модулированным (ЛЧМ) сигналом необходимо определить информационный объем охраняемой зоны (ОЗ). В общем виде информационные возможности РЛТСО связаны с разрешающей способностью по дальности, по азимуту и по углу места. Она будет оцениваться числом степеней свободы, характеризующим объем ОЗ. При этом следует учесть, что угол места для РЛТСО не учитывается, так как объектом обнаружения является человек, находящийся на земной поверхности. Таким образом, информационный объем вырождается в информационную плоскость.

РЛТСО можно отнести к системам обработки пространственно-временных сигналов (ПВС)  $S(x, y, t)$  в плоскости ОЗ [1]. ПВС в общем случае может содержать в себе огромное количество информации. В результате преобразований исходного ПВС часть информации теряется в трактах обработки и в реальных системах получается результат либо с конечной точностью, либо с конечной вероятностью.

В общем виде при работе радиоэлектронных систем (РЭС) невозможно количественно определить ценность информации, так как ценность имеет субъективный характер. Поэтому необходимо рассматривать количество информации РЭС как некоторую потенциальную величину, которой характеризуются регистрируемые ПВС и система их обработки.

Фундаментальным инвариантом информационной емкости системы является число  $N_{\text{св},0}$  полных степеней свободы ПВС, с которым работает система. Никакими методами невозможно получить большую информацию, чем та, которая определяется полным числом информационных степеней свободы [2]. ПВС включает в себя пространственные и временные степени свободы. В пределах полного числа информационных степеней свободы можно взаимно менять соотношения между пространственными и временными свободами, сохраняя при этом полное число  $N_{\text{св},0}$ .

Степени свободы ПВС определяются через теорему отсчетов В.А. Котельникова, которая была опубликована в 1933 г. [3]. По теореме Котельникова исходный сигнал с ограниченной частотой  $F_{\text{max}}$  спектром может быть представлен суммой отсчетов, взятых через интервал дискретизации:

$$\Delta t_n = \pi / \omega_m = 1 / 2F_{\text{max}}. \quad (1)$$

Количество степеней свободы для временного сигнала определяется числом отсчетов на интервале наблюдения  $T$ :

$$N_T = \frac{T}{\Delta t_n} + 1 = 2TF_{\text{max}} + 1, \quad (2)$$

где единица прибавляется как результат наличия независимого параметра, определяющего уровень отсчета, относительно которого заданы все значения составляющих  $S_n$  [1]. Чаще всего в системах обнаружения и измерения информационных параметров объекта используется такая характеристика РЭС, как разрешающая способность.

В общем виде разрешающая способность — это минимальное расстояние между объектами, на котором два объекта воспринимаются системой отдельно. Если количество степеней свободы трактовать как число отсчетов на характеристике обнаружения как функции изменения некоторого параметра в зависимости от времени или пространственных координат, то интервал дискретизации может быть определен как разрешающая способность системы.

С другой стороны, если в качестве основной характеристики системы используется разрешающая способность по измеряемому параметру, то для определения количества степеней свободы по формуле (2) следует разрешающую способность использовать в качестве интервала дискретизации.

Количество временных степеней свободы влияет на информационную емкость РЭС и их следует учитывать там, где для формирования сигналов тревоги используются временные параметры, например время задержки принятого сигнала по отношению к излученному в свободном пространстве.

Наибольшее распространение в РЛТСО получило использование пространственных параметров для извлечения информации о нарушениях в ОЗ [4, 5]. Теорема отсчетов (1) с успехом используется и для пространственных сигналов, причем независимо по трем ортогональным направлениям. При определении интервала пространственной дискретизации информационного сигнала в соответствии с формулой (1) требуется определить максимальную частоту в пространственном спектре сигнала, что может вызвать существенные затруднения. В этом случае следует воспользоваться разрешающей способностью по соответствующему ортогональному направлению и использовать эту характеристику для определения числа пространственных степеней свободы.

В общем виде необходимо учесть количество временных степеней свободы  $N_T$ , количество пространственных степеней свободы  $N_V$ , которые следует определить через количество информационных элементов пространства, реагирующих на нарушение охраняемой РЛТСО зоной. Кроме того, необходимо учесть число состояний отсчета  $N_D$ , характеризующее вид обнаружения –  $D \in \{B - \text{бинарное}, M - \text{многоальтернативное}\}$ . Тогда количество информации, заключенной в объеме охраняемой зоны, может быть описано выражением, введенным впервые Э. Хартли в 1928 г.:

$$I_{V,D} = \log_2(N_T \cdot N_V \cdot N_D), \quad (3)$$

где  $V \in \{0; 1; 2; 3\}$  – индекс мерности пространства обнаружения.

Работу РЛТСО можно отнести к двумерной многоальтернативной РЭС, когда в пространстве охраняемой зоны создается информационный объем анализа в виде плоскости. РЛТСО работают в активном режиме и характеризуются не только возможностью обнаружения нарушителя, но и измерением пространственного положения и классификацией нарушителя.

Многомерные многоальтернативные РЛТСО характеризуются большой сложностью обработки сигналов и возможностью классификации объектов по его изображению.

Определим информационный объем охраняемой зоны для частотной РЛТСО. В общем виде с учетом наличия земной поверхности информационный пространственный объем будет представлять собой в горизонтальной плоскости трапецию с размерами  $Y_{\min}$ ,  $Y_{\max}$  (рисунок 1).

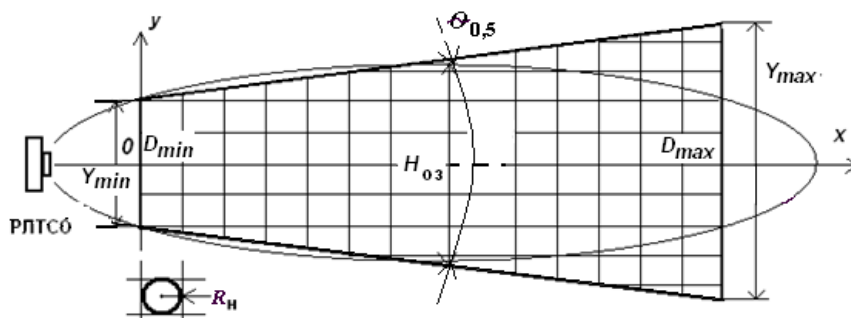


Рисунок 1 – Оценка информационного пространственного объема для РЛТСО в горизонтальной плоскости

На рисунке 1 применены следующие обозначения – минимальное  $D_{\min}$  и максимальное  $D_{\max}$  расстояния до  $H$ ; угловая ширина диаграммы направленности  $\alpha$  антенны РЛТСО в горизонтальной плоскости;  $H_{03}$  – средний поперечный размер ОЗ. Охраняемая зона в горизонтальной плоскости в виде трапеции разбита на элементы с размерами  $2(R_H \times R_H)$ . РЛТСО ориентированы на обнаружение человека-нарушителя, поэтому минимальный элемент разрешения по направлениям  $0x$  и  $0y$  будет определяться поперечными размерами  $H$ , пространственная модель которого может быть представлена цилиндром с радиусом основания  $R_H$ . С другой стороны, этот элемент разрешения будет определять потенциальную требуемую разрешающую способность по дальности  $\Delta D$  и по азимуту  $\Delta \alpha$ .

Чтобы определить информационную емкость РЛТСО, необходимо рассчитать число отсчетов по дальности  $N_D$  и по азимуту  $N_\alpha$ . С учетом обозначений, приведенных на рисунке 1, перейдем к ортогональной системе координат  $x0y$ .

Для определения числа элементов разрешения ОЗ необходимо учесть расширение ОЗ с увеличением дальности, которое зависит от угловой ширины диаграммы направленности  $\alpha$  антенны РЛТСО. Число отсчетов по оси  $Ox$

$$N_x = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2R_H}. \quad (4)$$

Число отсчетов по оси  $Oy$  зависит от координаты  $x$ , причем можно выделить число отсчетов для прямоугольной зоны шириной  $Y_{\min}$ :  $N_{1,Y} = Y_{\min} / 2R_H$  и число отсчетов для двух треугольных зон, в зависимости от  $x$ :

$$N_{2,Y}(x) = \frac{2x}{R_H} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_{0,5}}{2}, \quad (5)$$

где  $\theta_{0,5}$ , рад – ширина диаграммы направленности антенны по уровню 0,5.

При непрерывном изменении аргумента  $x$  должно формироваться целое число отсчетов  $N_{2,Y}$ . С учетом правила округления дробных чисел половина отсчетов будет равна  $N_{2,Y} \leq N_{2,Y}(x)$ , а другая половина отсчетов будет равна  $N_{2,Y} \geq N_{2,Y}(x)$ . В общей сумме число отсчетов в двух треугольных зонах для  $D_{\max}$  будет равно

$$N_{2,Y} = \frac{2 \cdot D_{\max}}{2 \cdot R_H} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_{0,5}}{2}. \quad (6)$$

Учтем, что для РЛТСО ширина ОЗ определяется при  $D_{\max}/2$ . Тогда

$$N_{1,Y} = (H_{O3} - D_{\max} \operatorname{tg} \frac{\theta_{0,5}}{2}) / 2R_H. \quad (7)$$

С учетом (3) получим выражение для потенциальной информационной емкости РЛТСО:

$$I_{\text{РЛТСО}}^{(p)} = \log_2 \left\{ \frac{(D_{\max} - D_{\min})}{4R_H^2} \cdot \left[ H_{O3} + D_{\max} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_{0,5}}{2} \right] \right\}. \quad (8)$$

Оценим потенциальную информационную емкость для следующих параметров РЛТСО:  $D_{\max} = 100$  м;  $D_{\min} = 1$  м;  $H_{O3} = 2$  м;  $\theta_{0,5} = 1^\circ$ . Из (8) следует, что  $I_{\text{РЛТСО}} = 8,16$  бит. Это соответствует 284 отсчетам, или степеням свободы, в горизонтальной плоскости ОЗ.

Реальная информационная емкость РЛТСО будет намного меньше потенциальной и определяется только разрешающей способностью по дальности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сальников И.И. Растровые пространственно-временные сигналы в системах анализа изображений. – М. : Физматлит, 2009. – 248 с.
2. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. – М. : Наука, 1971. – 616 с.
3. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. – М. : Госэнергоиздат, 1956.
4. Сальников И.И. Анализ пространственно-временных параметров удаленных объектов в информационных технических системах. – М. : Физматлит, 2011. – 252 с.
5. Справочное пособие по техническим средствам охраны границы / Под ред. И.Н. Крюкова. – М. : Граница, 2008. – 270 с.

УДК: 621.317

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТОТНОГО  
РАДИОЛОКАЦИОННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СРЕДСТВА ОХРАНЫ**

© *М.М. Бутаев, ОАО «Научно-производственное предприятие “Рубин”»  
(г. Пенза, Россия)*

© *И.И. Сальников, Пензенский государственный технологический  
университет (г. Пенза, Россия)*

**APPLICATION OF WAVELET-TRANSFORMATION FOR IMPROVING  
INFORMATION PARAMETERS OF A FREQUENT RADAR-TRACKING  
MEAN OF PROTECTION**

© *M.M. Butaev, JSC "NPP"Rubin"(Penza, Russia)*

© *I.I. Salnikov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассмотрено применение вейвлет-преобразования для обработки информации в частотных радиолокационных технических средствах охраны. Показано существенное улучшение таких информационных параметров, как разрешающая способность по дальности и отношение сигнал-шум.

**Ключевые слова:** вейвлет-функция, линейно-частотный модулированный сигнал, сжатие, база сигнала.

In a paper the application of wavelet-transformation for information processing in frequent radar-tracking means of protection is considered. The essential improving of such information parameters, as a resolving power on distance and signal-to-noise ration is shown.

**Key words:** wavelet-function linearly-frequent modulated signal, compression, basis of a signal.

В настоящее время широко используется частотный метод обнаружения и измерения дальности в радиолокационных технических средствах охраны (РЛТСО) с линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) сигналом [1–3]. Кроме того, настоящее время характеризуется бурным развитием методов цифровой обработки информации (ЦОИ) на основе использования микроконтроллеров и сигнальных процессоров, которые относятся к программным средствам, а также использования программируемых логических интегральных средств (ПЛИС), которые относятся к аппаратным средствам ЦОИ [4, 5].

Развивающиеся средства реализации методов ЦОИ позволяют использовать более сложные алгоритмы обработки информации. Для задач РЛТСО в качестве алгоритмов ЦОИ интерес представляет такое интегральное преобразование, как вейвлет-преобразование (ВП), представляющее собой интеграл свертки входного сигнала  $S_{\text{вх}}(t)$  и базового сигнала  $\psi(t)$ , называемого вейвлет-функцией [6]:

$$\Psi(\tau a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}(t) \cdot \psi\left(\frac{\tau - t}{a}\right) dt, \text{ В}^2\text{с}, \quad (1)$$

где  $a$  – масштаб. ВП (1) служит основой мощного алгоритма обнаружения известного принимаемого сигнала в шумах. Если сигнал известен, что соответствует методу, используемому в РЛТСО с ЛЧМ-сигналом, то в качестве вейвлет-функции используется сам сигнал, генерируемый системой.

Изменение информационного параметра сдвига  $\tau$  позволяет обнаружить момент совпадения исходного сигнала  $S_{\text{вх}}(t - \tau)$  и сдвигаемой вейвлет-функцией

$\psi(\tau - t)$ , причем  $\psi(t - \tau) = S_{\text{вх}}(t - \tau)$ . В момент их совпадения, когда  $t = t_z$ , выполняется суммирование двух функций с точностью до фаз гармонических составляющих. При этом результат ВП равен *энергии сигнала* при  $a = 1$ :

$$\Psi(0, 1, t_z) = E_S(t_z) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}(t - t_z) \cdot S_{\text{вх}}(\tau - t - t_z) dt = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}^2(t - t_z) dt, \text{ В}^2 \cdot \text{с}. \quad (2)$$

Особенностью (2) является зеркальное отображение вейвлет-функции относительно 0. Измерение информационного параметра сдвига  $\tau$  принимаемого сигнала относительно излученного позволяет определить дальность до цели [2]:

$$D_o = c \cdot \tau / 2, \quad (3)$$

где  $D_o$  – дальность до объекта;  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость ЭМ-волн в свободном пространстве.

Реализовать ВП можно только с использованием методов ЦОИ. При прямой реализации ВП по (1), когда неизвестен момент  $t_z$ , возникают значительные вычислительные трудности, связанные с реализацией перебора по параметру  $t_z$ . Эти трудности можно обойти, если использовать свойство интеграла свертки – замены его произведением комплексных амплитудно-частотных спектров исходного сигнала и вейвлет-функции [3]:

$$\Psi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{вх}}(t) \cdot \psi(\tau - t) dt = \dot{\Phi}_O \{ \dot{\Phi}_S(j\omega) \cdot \Phi_{\psi}^*(j\omega) \}, \quad (4)$$

где  $\dot{\Phi}_S\{S(t)\}$  – преобразование Фурье;  $\dot{\Phi}_O\{\dots\}$  – обратное преобразование Фурье.

Вычисление дискретного комплексного амплитудно-частотного спектра тоже сопряжено с большими вычислительными затратами. Здесь следует использовать важнейшее достижение методов ЦОИ – быстрое преобразование Фурье [7]. Тогда для вычисления интеграла свертки по (1) следует выполнить операции, представленные на рисунке 1.

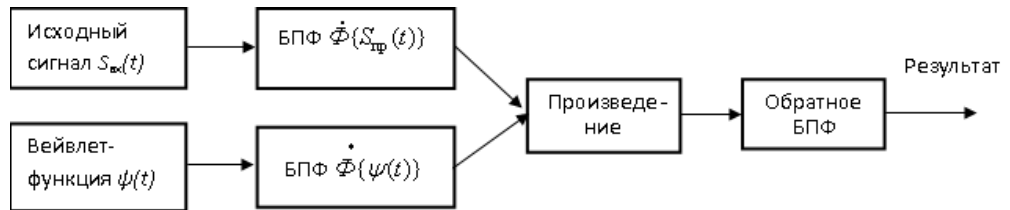


Рисунок 1 – Схема операций для вейвлет-преобразования

В настоящее время аппаратно реализовать БПФ вполне реально, так как существуют специально разработанные сигнальные процессоры, реализующие алгоритм БПФ. Следует отметить, что ВП даст значительный эффект в виде существенного улучшения отношения сигнал-шум и сжатия длительности ЛЧМ-сигнала, так как обрабатываемый сигнал является *сложным*. Условием сложного сигнала является [1]:

$$b_s = \Delta f_s \cdot T_s \gg 1, \quad (5)$$

где  $b_s$  – *база сигнала*,  $\Delta f_s = 2 f_d$  – полоса частот в спектре входного сигнала, равная удвоенному значению девиации  $f_d$  частоты ЛЧМ-сигнала;  $T_s = T_M$  – длительность сигнала, равная периоду ЛЧМ-сигнала.

При выполнении вейвлет-преобразования для сложных сигналов наблюдается эффект сжатия сигнала по длительности в  $b_s$  раз и увеличение амплитуды



отклика в  $\sqrt{b_s}$  раз. Для  $\Delta f_s = 2f_d = 50$  МГц;  $T_s = T_m = 1/(12 \text{ кГц})$ , из (5) следует  $b_s = 4170$ . Это позволяет улучшить отношение сигнал-шум в  $\sqrt{b_s} = 64,6$  раза. Кроме того, сжатие по длительности в  $b_s$  раз позволяет в РЛТСО существенно улучшить разрешающую способность по дальности и определить число нарушителей.

Таким образом, из существующих цифровых методов обработки информации наиболее перспективным для использования в РЛТСО с ЛЧМ-сигналом является метод с вейвлет-преобразованием, который дает значительный эффект по улучшению отношения сигнал-шум и разрешающей способности по дальности.

На рисунке 2 представлена структурная схема РЛТСО с дополнительной обработкой сигнала в виде ВП. При этом, в соответствии с выражением (4), используются два блока БПФ для формирования частотных спектров излученного и отраженного от нарушителя ЛЧМ-сигналов, блок перемножителя комплексных чисел и блок обратного БПФ (ОБПФ).



Рисунок 2 – Структурная схема РЛТСО с вейвлет-преобразованием

Здесь используется гетеродинирование принимаемого сигнала, то есть смещение частотного спектра вниз по частоте. При этом девиация частоты сохраняется. Для гетеродинирования используется смеситель См и генератор опорной частоты  $f_r$  для реализации смещения частоты в область низких частот, то есть для устранения несущей частоты так, чтобы  $f_{\min} = 0$ , а  $f_{\max} = 2f_d$ .

Блок дополнительной обработки (БДО) сигнала может быть выполнен либо на сигнальных процессорах, реализующих БПФ, либо на ПЛИС. Микроконтроллер МК выполняет роль управляющего устройства, которое формирует импульсную последовательность (ИП) с частотой модуляции  $f_m$ . ИП в схеме ЛИН преобразуется в линейно-изменяемое напряжение, которое изменяет частоту генерируемых высокочастотных колебаний, формируя ЛЧМ-сигнал. Радиопередающее устройство РПУ представляет собой усилитель мощности, используемый для создания на входе антенны А ЛЧМ-сигнала заданного уровня. На рисунке 2 условно показано, что излучаемый сигнал, кроме А, подводится еще и на вход радиоприемного устройства РПРУ.

В реальных системах если используется одна антенна, то необходимо развязывающее устройство в виде направленного ответвителя (НО), которое должно гасить сигнал, попадаемый на вход РПрУ с выхода РПУ.

МК также формирует измеренные информативные параметры нарушений ОЗ:

- наличие факта нарушения,
- число нарушителей в охраняемой зоне,
- дальность до нарушителей.

БДО сигнала и МК могут быть реализованы в единой программной среде с использованием:

- бортового компьютера, если РЛТСО с ЛЧМ-сигналом используется для охраны мобильных объектов;
- малогабаритного компьютера, так называемого «наладонника»;
- СнК – системы на кристалле, для которой на одном кристалле БИС размещаются и программно-управляемый МК, и программно-управляемый сигнальный процессор (СП) с реализованными функциями перемножения комплексных чисел, БПФ, масштабирования с заданным коэффициентом и др.

Программная реализация БДО сигнала и МК для РЛТСО обладает тем достоинством, что можно легко изменять алгоритмы анализа сигналов и настраивать структуру схемы обработки. Однако программная реализация обладает меньшим быстродействием, чем аппаратная. Наиболее перспективным средством для аппаратной реализации вейвлет-преобразования являются ПЛИС, вычислительные возможности которых непрерывно растут. При реализации БПФ на ПЛИС возможно распараллеливание операций, которое следует из алгоритма БПФ. При этом существенно увеличивается быстродействие проектируемой РЛТСО с ЛЧМ-сигналом.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Ширмана Я.Д. – М. : Советское радио, 1970. – 560 с.
2. Гришин Ю.П. Радиотехнические системы / Гришин Ю.П., Ипатов Ю.М., Казаринов Ю.М. [и др.] ; Под ред. Казаринова Ю.М. – М. : Высш. шк., 1990. – 496 с.
3. Сальников И.И. Анализ пространственно-временных параметров удаленных объектов в информационных технических системах. – М. : Физматлит, 2011. – 252 с.
4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. – М. : Бином, 2007. – 656 с.
5. Сальников И.И. Растровые пространственно-временные сигналы в системах анализа изображений. – М. : Физматлит, 2009, 248 с.
6. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб. : ВУС, 1990. – 208 с.
7. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. – М. : Мир, 1989. – 448 с.

УДК 004.031

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ  
НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

© *А.А. Папко, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений" (ОАО "НИИФИ") (г. Пенза, Россия)*

© *И.Ю. Сёмочкина, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

© *А.М. Михеев, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)*

**MODELS AND ALGORITHMS FOR INFORMATION SUPPORT  
OF A SCIENTIFIC EXPERIMENT**

© *A.A. Papko, Joint stock company "Research institute for physical measurements" (ISC "N1IFI") (Penza, Russia)*

© *I.U. Semochkina, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *A.M. Mikheev, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

В статье рассматривается актуальность разработки современных программно-аппаратных комплексов для контроля состояний удалённых физических объектов. Контроль объекта мониторинга осуществляется в рамках проведения научного эксперимента при помощи средств ПНЭ, результаты фиксируются в базе данных.

**Ключевые слова:** информация, научный эксперимент, физический объект, мониторинг, контроль.

The article considers the relevance of the modern software and hardware systems development for physical objects' state remote control. Object control is scientific experiment by means system', the results recorded in database.

**Key words:** information, a scientific experiment, a physical object, monitoring and control.

Развитие современных методов сбора и обработки информации о состоянии физических объектов невозможно без разработки прикладных программных комплексов, основная цель которых – обеспечить оценку состояния объекта по совокупности значений физических параметров, получаемых с удалённых источников измерительной информации. Таким образом, получение экспериментальной измерительной информации с удалённого физического объекта в рамках поддержки научного эксперимента осуществляет подсистема сбора и обработки данных, основными функциями которой являются:

- получение измерительной информации,
- обработка измерительной информации,
- удаленный обмен данными между удалённым объектом и подсистема сбора и обработки данных.

Поскольку для передачи информации используется некий несущий сигнал, выполняющий функцию транспорта для доставки информации, измерительные данные с удалённого физического объекта система сбора и обработки данных получает в виде цифрового сигнала. Однако измерительная информация, получаемая подсистемой сбора данных за относительно короткий промежуток времени, представляет собой только первичные, или так называемые «сырые данные» о состоянии удалённого физического объекта (ФО). Следовательно, по первичной измерительной информации за короткий промежуток времени можно произвести только первичную оценку его состояния, а дальнейшее прогнозирование

вание его поведения невозможно по причине отсутствия необходимого количества данных.

Таким образом, соответствующая система поддержки научного эксперимента (ПНЭ) должна обеспечить:

- сбор и обработку измерительной информации;
- обмен данными между удалённым объектом и информационной системой;
- идентификацию состояний исследуемого физического объекта по совокупности накопленной информации;
- визуальный контроль состояния физического объекта через *web*-интерфейс;
- дистанционное управление измерительным экспериментом.

В процессе исследования были проведены работы:

- разработан электронный депозитарий, обеспечивающий хранение планов экспериментов и полученной в ходе них измерительной информации;
- в качестве структуры данных электронного депозитария использована распределенная реляционная база данных, обеспечивающая дистанционный доступ к структурированной измерительной информации посредством сети передачи данных *Intranet* и *Internet*.

Доступ к панели инструментов осуществлялся через графический *web*-интерфейс с разграничением прав доступа.

Мониторинг удалённого ФО средствами ПНЭ позволял осуществлять визуальный контроль его состояния как в целом, так и отдельных его параметров через *web*-интерфейс.

Контроль состояния ФО включает в себя:

- непрерывную и систематическую регистрацию изменения его параметров в процессе обмена данными между удалённым объектом и средствами сбора и обработки информации;
- обработку измерительной информации, т.е. преобразование её из полученного формата в структурный вид, после получения её по протоколу *HTTP* в форматах: *JSON*, *XML*.

Идентификация состояния удалённого ФО в текущий момент времени представляет некую совокупность информации об исследуемом объекте для возможности дальнейшего прогнозирования его поведения.

При создании средства поддержки научного эксперимента была найдена практическая реализация подхода к созданию системы контроля состояния физического объекта.

При функционировании ПНЭ осуществляется контроль входной и выходной информации, в том числе данных, вводимых пользователем, и данных, содержащихся в таблицах базы данных. Предусмотрена защита от неправильного ввода данных. Подробные данные охраняются в единой базе данных. Целостность и сохранность данных обеспечивается выбранной СУБД.

Используемые аппаратные и системные платформы обеспечивают сохранность и целостность информации при полном или частичном отключении электропитания, аварии сетей телекоммуникации, полном или частичном отказе технических средств системы.

Доступ к панели управления средствами контроля состояния физического объекта осуществляется через локальную сеть или сеть *Internet* посредством браузера. На рисунке 1 представлена диаграмма развёртывания, показывающая взаимосвязи между подсистемами и осуществление доступа к информационной системе пользователей, а также и аппаратные и программные средства, необходимые для её функционирования [4].

Система управления содержимым и система отображения информации включают в себя слой представления, который отвечает за реакцию системы на действия пользователя, он спроектирован по шаблону проектирования *Model View Presenter*, являющийся производным от *Model View Controller* [1], который является наиболее подходящим шаблоном проектирования пользовательского интерфейса в настоящее время. При этом используется в качестве платформы разработки классическая технология разработки приложений в сети интернет *ASP.NET*.

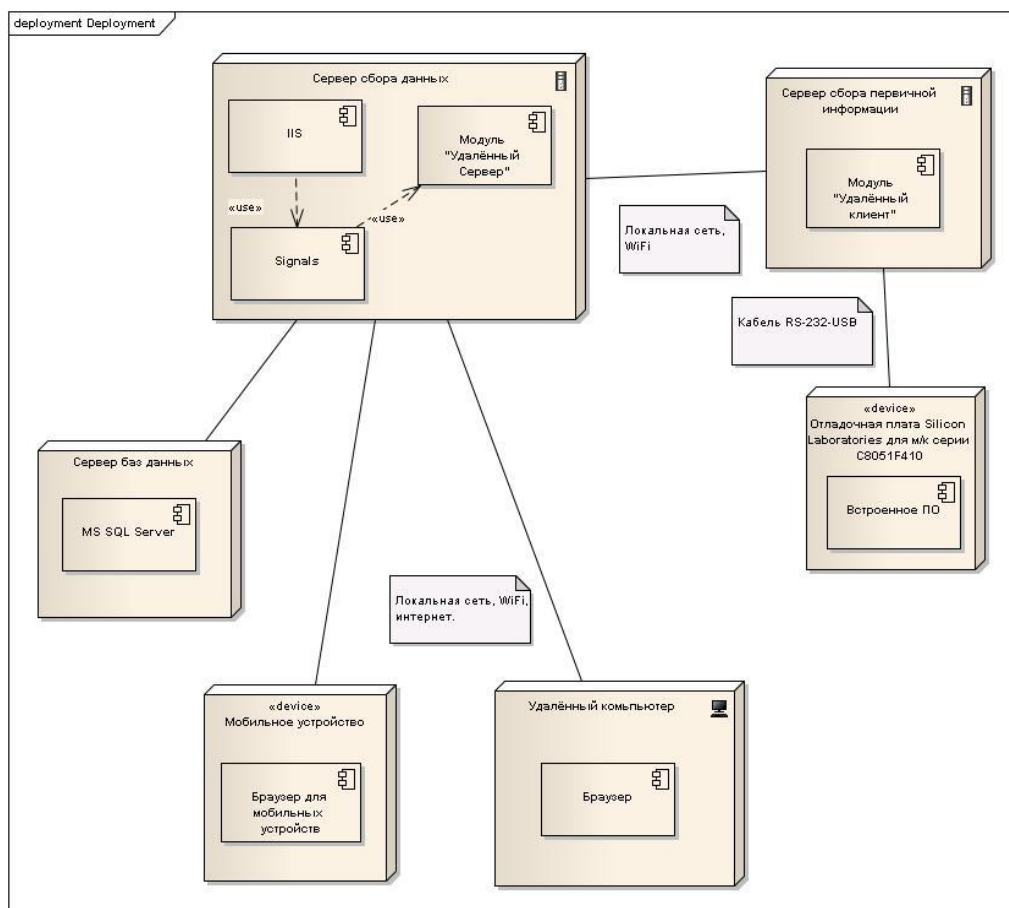


Рисунок 1 – Диаграмма развёртывания

В шаблоне проектирования *MVP (Model-View-Presenter)* слой представления (*View*) и слой бизнес-логики или модель (*Model*) не содержат прямой ссылки друг на друга, что позволяет упростить процесс тестирования и изменения графического отображения на *web*-странице (*View*), а взаимодействие между ними осуществляется через некоего посредника – презентующего или представляющего (*Presenter*). Презентующий, с одной стороны, интерпретирует действия, возникшие в представлении (*web*-странице), передавая модели возможность их обработки, а с другой стороны, оповещает представление о необходимости его обновления для отображения изменения данных.

Поскольку в качестве программной платформы для разработки модели информационной системы была выбрана *web*-ориентированная технология *ASP.NET MVC (Model-View-Controller)* и современный объектно-ориентированный язык программирования *C#*, следовательно, вся структура долж-

на быть спроектирована согласно принципам объектно-ориентированного программирования [2, 3, 5].

В информационной системе классы, составляющие объектную модель, находятся в слое бизнес-логики. Структура модели системы управления содержанием представлена в виде общей диаграммы классов на рисунок 2.

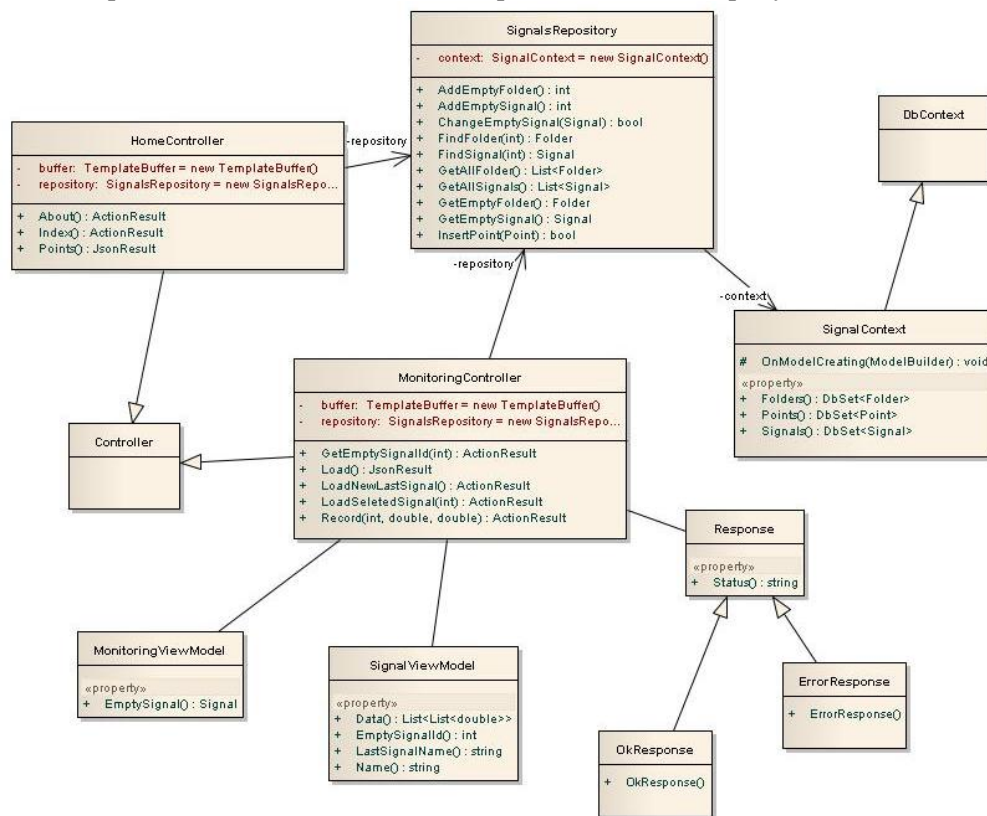


Рисунок 2 – Диаграмма классов

Был проведён анализ в области средств поддержки эксперимента, в результате были выявлены основные требования. ПНЭ должна обеспечивать оценку состояния объекта по совокупности значений физических параметров, получаемых с удалённых источников измерительной информации.

В процессе проектирования и разработки ПНЭ были решены следующие задачи:

- обозначены задачи, выполнение которых необходимо для возможности функционирования системы;
- спроектирована общая архитектура ПНЭ;
- проведён анализ возможностей реализации программно-аппаратной части.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эспозито Д. Microsoft ASP.NET 2.0 базовый курс. – Вильямс, 2007. – 688 с.
2. Шилд Г. Полный справочник по C#. – Вильямс, 2009. – 752с.
3. Системы интеллектуального анализа данных: методология, реализация, приложения: Монография / Под науч. ред. А.Г. Дмитриенко. – Пенза : Приволжский Дом знаний. – 2013. – 164 с.

4. Фаулер М., Скотт К. *UML : – Пер. с англ. – СПб. : Символ-Плюс, 2002. – 192 с. : ил.*
5. Фаулер М. *Архитектура корпоративных программных приложений. – М., 2007. – 540 с.*
6. <http://www.aspiringcraftsman.com/2007/08/interactive-application-architecture/>

**УДК 004.031**

**ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ  
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ МДП-СТРУКТУР**

© **А.Г. Дмитриенко**, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений" ("НИИФИ") (г. Пенза, Россия)

© **А.А. Папко**, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений" ("НИИФИ") (г. Пенза, Россия)

**RESULTS OF THE INCREASING STABILITY MEMS ACCELEROMETERS  
THROUGH THE USE OF THE STRUCTURE WITH THE PULSE  
BALANCING OF CHARGES**

© **A.G. Dmitrienko**, Joint stock company "Research institute for physical measurements" (ISC "N1IFI") (Penza, Russia)

© **A.A. Papko**, Joint stock company "Research institute for physical measurements" (ISC "N1IFI") (Penza, Russia)

В статье рассмотрены информационные параметры различных схем микромеханических акселерометров при реализации их в виде МДП-структур. Показано, что следует отдать предпочтение методам оптимизации по единичным показателям качества с применением критериев, обеспечивающих минимизацию дисперсий отклонений информационной характеристики от ожидаемого значения.

**Ключевые слова:** информационные параметры, МДП-структура, акселерометр, информационно-измерительная цепь.

In a paper the information parameters of the various schemes of micromechanical accelerometers are considered at a realization them as MDS-structures. Is shown, that is necessary to prefer methods of optimization on single indexes of quality with application of criterions ensuring minimization of variances of deviations of an information testimonial from of an expected value.

**Key words:** information parameters, MDS-structure, accelerometer, informational- measuring a circuit.

Известно [1, 2], что при оптимизации устройств или систем по одному параметру чаще всего выбирается критерий в виде функционала, конструируемого таким образом, чтобы оптимальному решению соответствовал минимум требуемого показателя качества, который может быть представлен в виде отклонения или погрешности. Например, при достижении минимальных отклонений значения выходного напряжения акселерометра в момент включения питания от значения выходного напряжения через какой-либо промежуток времени критерием оптимальности может служить минимум ошибки, выраженной в виде функционала от квадратичной разности между требуемым и фактическим значениями выходного напряжения акселерометра в этом интервале времени.

При оптимизации по нескольким параметрам критерий может задаваться в виде интегрального квадратичного функционала от нескольких функций с произвольным назначением весовых коэффициентов для каждого из показателей качества, вследствие чего полученные результаты имеют субъективный характер. Недостатки методов синтеза устройств по совокупности качественных показателей позволяют отдать предпочтение методам оптимизации по единичным показателям с применением критериев, обеспечивающих минимизацию дисперсий отклонений метрологической или какой-либо другой характеристики от ожидаемого значения.

Хорошо известным и широко используемым способом выбора структуры построения датчиков любой физической величины является использование результатов моделирования различных структур построения информационных измерительных цепей (ИИЦ) и сравнение полученных метрологических характеристик между собой. Оптимальной может считаться та структура, которая обеспечивает соответствие заданных требований по наибольшему числу характеристик. Моделирование измерительных цепей емкостного датчика перемещения акселерометра для определения оптимальной структуры построения применялось и раньше [3]. Однако серийное освоение микромеханических акселерометров показало, что существующие модели не учитывают влияние фликкер-шумов, вызванных нестабильностью зарядового состояния кремниевых поверхностей, и в настоящее время отличаются неудовлетворительной достоверностью и не позволяют проводить правильный выбор структуры построения для этого типа акселерометров.

Из-за естественного образования пленки диоксида кремния на поверхности кристалла чувствительного элемента (ЧЭ) при напылении металлизированных электрических контактов возникает МДП-структура, которая по сути представляет собой управляемый конденсатор [4]. Емкость этого конденсатора является паразитной по отношению к кремниевому ЧЭ, а процессы релаксации заряженных систем в МДП-структуре приводят к возникновению положительной обратной связи в цепи уравнивания. Попытки выявления источников ее возникновения путем моделирования зарядно-разрядных явлений предпринимались достаточно давно, но подбор параметров цепей, исходя из реально достижимых и независимых от времени параметров МДП-структуры, не приводил к положительным результатам [4]. Например, в идеальной МДП-структуре транзистора достижимые значения емкостей переходов колеблются в пределах десятков пФ, а сопротивлений – в пределах сотен МОм и приводят к постоянным времени релаксации не более 0,1 с, что не соответствует действительности.

Представленные ниже результаты исследований можно связать с длительным изменением эквивалентной дифференциальной емкости МДП-структуры, приводящей к перераспределению зарядов в конденсаторах ЧЭ.

Основываясь на известных доказательствах экспоненциального закона поведения разрядных явлений [5], экспериментально подтвердили возможность использования формальной гипотезы о том, что электрическую схему ЧЭ акселерометра с учетом паразитных параметров МДП-структуры можно представить в виде последовательного соединения эквивалентной емкости МДП-структуры

$C_D = C_{D0}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$  и измерительных емкостей, где  $C_{D0}$  – значение емкости в момент включения питающего напряжения  $t = t_0$ . Использование новой модели схемы ЧЭ позволит уточнить математические модели функций преобразования наиболее распространенных ИИЦ и структур построения акселерометров.



Таким образом, критерий оптимизации выбора ИИЦ акселерометра можно представить в виде функционала

$$L(t) = \int_{t_0}^{t_y} \left[ \frac{U_{\text{ВЫХ}}(t_0) - U_{\text{ВЫХ}}(t)}{U_{\text{ВЫХ}}(t_0)} \right]^2 dt = \int_{t_0}^{t_y} \left[ 1 - \frac{U_{\text{ВЫХ}}(t)}{U_{\text{ВЫХ}}(t_0)} \right]^2 dt = \min, \quad (1)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}(t_0)$  и  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  – выходной сигнал акселерометра через установленный промежуток времени  $t_y$  и в момент включения питания  $t_0$ .

Для варианта ИИЦ, представленного на рисунке 1, уравнение для  $U_{\text{ВЫХ}}(t)$  может быть записано как

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = -E \frac{C_1(t)}{C_2(t)} = -E \frac{C_{11} (C_{11} + C_D(t))}{C_{22} (C_{22} + C_D(t))} = -E \frac{C_{11} \left[ C_{11} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]}{C_{22} \left[ C_{22} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]}, \quad (2)$$

где  $C_{11}$  и  $C_{22}$  – емкости дифференциального конденсатора ЧЭ,  $\tau$  – время релаксации. При этом на рисунке 1 используются обозначения:

$E$ ,  $\omega_{\text{пит}}$  – амплитуда и частота генератора напряжения;  $C_1$ ,  $C_2$  – измерительные емкости;  $A_1$  – операционный усилитель.

Учитывая, что при  $t = t_0$   $C_D(t_0) \gg C_{11}$ , уравнение для  $U_{\text{ВЫХ}}(t_0)$  может быть записано как

$$U_{\text{ВЫХ}}(t_0) = -E \frac{C_{11}}{C_{22}}. \quad (3)$$

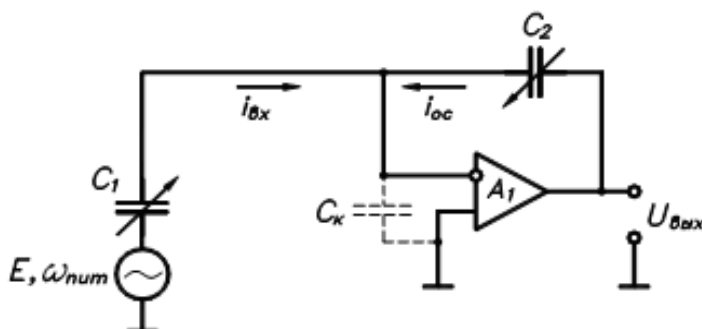


Рисунок 1 – Вариант ИИЦ  
с дифференциально-логометрическим включением

Таким образом, уравнение для функционала от квадратичной разности между требуемым и фактическим значениями выходного напряжения акселерометра в интервале времени от  $t_0 = 0,1$  с до  $t_{\text{max}} = 600$  с примет вид

$$L1(t) = (C_{11} - C_{22})^2 \int_{t_0}^{t_{\text{max}}} \left[ \frac{1}{C_{11} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)} \right]^2 dt = \min. \quad (4)$$

В случае применения ИИЦ, представленной на рисунке 2, уравнение для  $U_{\text{ВЫХ}}$  может быть записано как

$$U_{\text{вых}} = \frac{-E\omega_{\text{пит}} R C_1(1+r_d C_2 p) - C_2(1+r_d C_1 p)}{R C_3 p + 1 (1+r_d C_1 p)(1+r_d C_2 p)} \approx -\frac{E\omega_{\text{пит}} R C_0}{(R C_3 p + 1)x_0} \cdot \left( \frac{\pm \Delta x}{1-\gamma_x^2} \right), \quad (5)$$

где  $R$ ,  $C_3$  – резистор и конденсатор обратной связи усилителя заряда.

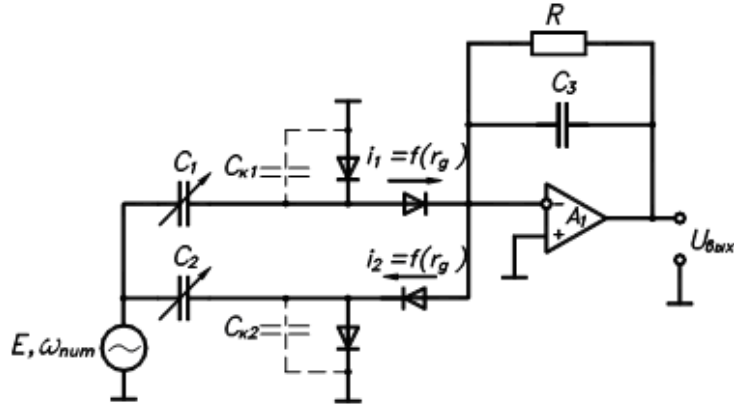


Рисунок 2 – Вариант ИИЦ  
для приборов со статическим уравниванием

Таблица 1 – Результаты моделирования ИИЦ и структур акселерометров

| Название информационно-измерительной цепи и структуры построения и описание функционала                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $L_i(t)$<br>при<br>$\tau = 600 \text{ с}$ ,<br>отн.ед. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1. ИИЦ с дифференциально-логометрическим включением ДКМ<br>$L_1(t) = (C_{11} - C_{22})^2 \int_{t_0}^{t_{\max}} \left[ \frac{1}{C_{11} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)} \right]^2 dt$                                                                                                                                                                                                              | 16,28                                                  |
| 2. ИИЦ со статическим уравниванием<br>$L_2(t) = \int_{t_0}^{t_{\max}} \left[ \frac{C_{D0}^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)^2}{\left[ C_{11} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] \left[ C_{22} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]} \right]^2 dt$                                                                                                                  | 513,64                                                 |
| 3. ИИЦ с уравниванием зарядов<br>$L_4(t) = C_{11}^2 C_{22}^2 (C_{11} + C_{22})^2 \times$<br>$\times \int_{t_0}^{t_{\max}} \left[ \frac{1}{0,5 C_{11}^2 \left[ 2 C_{22} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] + 0,5 C_{22}^2 \left[ 2 C_{11} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] + C_{11} C_{22} \left[ C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]} \right]^2 dt$ | 4,02                                                   |

При переходе от изображения к оригиналу уравнение преобразуется к следующему виду:

$$U_{\text{вых}}(t_0) = -E\omega_{\text{пит}} R(C_{11} - C_{22}) \left( C_{11} \frac{e^{-\frac{t}{\tau_4}}}{\tau_4} - C_{22} \frac{e^{-\frac{t}{\tau_5}}}{\tau_5} \right) \frac{e^{-\frac{t}{\tau_3}}}{\tau_3}. \quad (6)$$

Уравнение для  $U_{\text{вых}}(t_0)$  может быть записано как

$$U_{\text{вых}}(t_0) = E \frac{C_{11} - C_{22}}{C_{11} + C_{22}}. \quad (7)$$

Тогда уравнение для приведенного функционала от квадратичной разности между требуемым и фактическим значениями выходного напряжения акселерометра примет вид:

$$L3(t) = C_{11}^2 C_{22}^2 (C_{11} + C_{22})^2 \times \times \int_{t_0}^{t_{\max}} \left[ \frac{1}{0,5C_{11}^2 \left[ 2C_{22} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] + 0,5C_{22}^2 \left[ 2C_{11} + C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right] + C_{11}C_{22} \left[ C_{D0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]} \right]^2 dt. \quad (8)$$

Результаты сравнения значений функционала (таблица 1) подтверждают предположение о невозможности построения высокостабильных МЭМС-акселерометров по структуре статического уравнивания. Кроме того, результаты моделирования подтверждают возможность повышения стабильности МЭМС-акселерометров в случае применения структуры с импульсным уравниванием зарядов. Из таблицы 1 видно также, что для их построения более приемлемы структуры ИИЦ схем на переключаемых конденсаторах или цепи с импульсным уравниванием зарядов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В.А. *Динамический синтез систем автоматического регулирования*. – М. : Наука, 1965. – 515 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. *Теория систем автоматического регулирования*. – М. : Наука, 1975. – 767 с.
3. Мокров Е.А., Папко А.А. *Статико-динамические акселерометры для ракетно-космической техники*. – Пенза : ПАИИ, 2004. – 164 с.
4. Зи С. *Физика полупроводниковых приборов : В 2-х томах*. – М. : Мир, 1984.
5. Кузьмичев В.Е. *Законы и формулы физики*. – Киев : Наук. думка, 1989. – 864 с.

УДК: 661.214.2; 502.3

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МНОГОФАКТОРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ  
МОДЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
КОМПОЗИТОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

© *А.Н. Бормотов, Пензенский государственный технологический  
университет, (г. Пенза, Россия)*

© *И.А. Прошин, Пензенский государственный технологический  
университет, (г. Пенза, Россия)*

**THE METHOD OF CONSTRUCTING MULTIFACTORIAL  
NONLINEAR MODELS AS MATHEMATICAL MODELING COMPOSITE  
SPECIAL PURPOSE**

© *A.N. Bormotov, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

© *I.A. Proshin, Penza State Technological University (Penza, Russia)*

Предлагается метод математического моделирования композитов посредством интерполяции моделей во внутренней области факторного пространства состояний математическими моделями в преобразованных координатах, на основе которых синтезируются многофакторные модели, экстраполируемые в область предельных значений дробно-рациональными функциями из «пучка» функций.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, композиционные материалы, синтез многофакторных моделей, численные методы.

We propose a method of mathematical modeling of composites by interpolation models in the inner region of the factor space of states of mathematical models in the transformed coordinates, which are synthesized on the basis of multivariate models, extrapolated to the limiting values of a rational function of the "beam" functions.

**Key words:** mathematical modeling, composite materials, the synthesis of multifactor models, numerical methods.

На основе методологических принципов математического моделирования композиционных материалов [1–3] в данной работе предлагается **комплексный метод** математического моделирования, суть которого состоит в интерполяции моделей во внутренней области факторного пространства состояний математическими моделями в преобразованных координатах, на основе которых синтезируются многофакторные модели, экстраполируемые в область предельных значений дробно-рациональными функциями из «пучка» функций.

Предлагаемый комплексный метод включает в себя три компонента:

- 1) построение многофакторных нелинейных моделей на основе многоуровневых преобразований координат;
- 2) структурно-параметрический синтез математических моделей в преобразованных координатах;
- 3) построение многофакторных нелинейных моделей на основе выбора моделей по краевым точкам.

Первый компонент математического моделирования предлагается использовать для отыскания функциональных зависимостей во внутренней области факторного пространства, в области нормальных значений.

Второй компонент предназначен для решения задач выбора структуры и параметров нелинейных моделей рассматриваемых зависимостей по совокупности экспериментальных данных.

Третий компонент направлен на отыскание функциональных зависимостей в области предельных значений независимых переменных или по краям факторного пространства.

В качестве основы моделирования будем использовать многофакторные модели, полученные в результате структурно-параметрического синтеза моделей по центральной части факторного пространства. Сопряжение с крайними точками проводим в линеаризованном виде по результатам эксперимента в вершинах факторного пространства, проведенного при помощи математических планов.

С математической точки зрения выделяем два основных аспекта проведения эксперимента в краевых точках:

1. Получение точечных и интервальных оценок некоторых параметров и коэффициентов вероятностно-статистических моделей КМ.
2. Эффективное восстановление неизвестной функции нескольких переменных по экспериментальным данным.

Однако на одном и том же наборе данных можно построить целый ряд моделей с различными формами представления и по различным критериям. Следовательно, при планировании необходимо иметь как наборы моделей, так и соответствующие критерии по их выбору.

Указанная задача приводит к получению модели КМ, которая в дальнейшем будет использована для оптимизации или прогнозирования поведения. Это требует привлечения методологии теории моделирования и методов, которые используются при моделировании систем.

Рассмотрим, во-первых, шесть моделей результатов подбора оптимального гранулометрического состава композиционных материалов (КМ), которые отобраны исходя из известной (условно) теоретической модели, характеризуемой наличием слагаемого  $b_1x_1$  в знаменателе; во-вторых, для сравнения и выбора моделей используются девять точек внутри области планирования. Соответствующие значения функций отклика, полученные в данных точках, приведены в таблице 1.

На рисунке 1 показана область планирования, на которой: (•) – узлы интерполяции, т.е. исходные точки для построения моделей; (\*) – координаты точек согласно таблице 1.

Таблица 1

| Номер точки | Координаты точек |       | Функции отклика |           |           |            |            |            |
|-------------|------------------|-------|-----------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
|             | $x_1$            | $x_2$ | $y^{(1)}$       | $y^{(3)}$ | $y^{(5)}$ | $y^{(11)}$ | $y^{(13)}$ | $y^{(17)}$ |
| 1           | 0,5              | 0,5   | -2,366          | -1,79     | -2,291    | -2,292     | -2,292     | -1,8       |
| 2           | -0,5             | 0,5   | 2,368           | 1,8       | 2,296     | 2,294      | 2,294      | 1,8        |
| 3           | 0,5              | -0,5  | -2,899          | -4,25     | -2,807    | -2,809     | -2,809     | -4,25      |
| 4           | -0,5             | -0,5  | 2,901           | 4,24      | 2,813     | 2,811      | 2,811      | 4,25       |
| 5           | 0                | 0     | 0,0009          | 0,003     | 0,003     | 0,0009     | 0,001      | 0,002      |
| 6           | 1                | 0     | -5,266          | 0,003     | -5,05     | -5,05      | -5,05      | 0,002      |
| 7           | 0                | 1     | 0,001           | 0,0005    | 0,003     | 0,001      | 0,0009     | 0,001      |
| 8           | 1                | 0     | 5,268           | 0,003     | 5,052     | 5,052      | 5,052      | 0,002      |
| 9           | 0                | -1    | 0,0006          | -0,0008   | 0,004     | 0,0006     | 0,001      | 0,0006     |

В общем случае число точек внутри области определения может быть больше и соответствующие расположения другими. Как следует из таблицы 1, разброс значений функций-претендентов в рассматриваемых точках относи-

тельно небольшой. Исключение представляют функции  $y^{(3)}$  и  $y^{(17)}$ , значения которых в ряде точек явно отличаются от остальных значений, что связано с конечной точностью вычислений, которая не позволяет корректно раскрыть неопределенность типа 0/0. Данный характерный случай указывает на сложность применения моделей в виде рациональных функций. В качестве выхода из изложенной ситуации можно либо исключить модель с особенностями из рассмотрения, либо исключить из рассмотрения точку с разрывом, либо увеличить точность вычислений или разрешить неопределенность типа 0/0 аналитически.

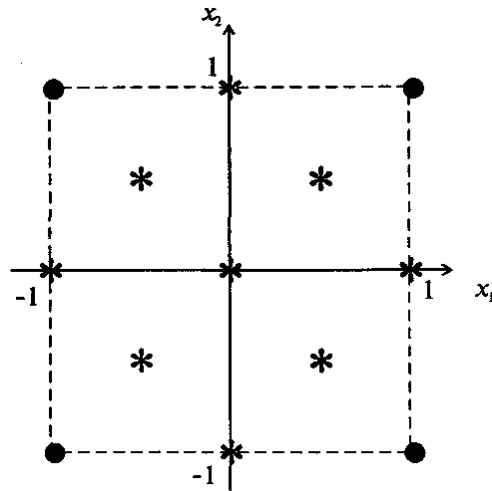


Рисунок 1 – Область планирования:

• – узлы интерполяции; \* – координаты проверочных точек

В качестве внутреннего критерия будем использовать *простейший точечный критерий*, который предусматривает сравнение поведения функций в нуле, т.е. в точке с координатами  $x_1 = x_2 = 0$  (пятая строка в таблице 1). В соответствии с критерием функции ранжируем по мере их удаления относительно некоторой оценки их среднего либо математического ожидания, либо медианы. В рассматриваемом случае математическое ожидание равно 0,0018, следовательно, в порядке убывания приоритета модели-претенденты расставляются в следующей последовательности по их номерам: 13, 1, 11, 5. Однако данный критерий имеет недостатки.

Для оценки моделей в системе компьютерного и имитационного моделирования КМ предлагается *интегральный критерий*, предусматривающий исследование рассеяния пучка функций-претендентов по ряду точек внутри области определения. В качестве оценки меры отклонения функций друг от друга используем сумму квадратов отклонений:

$$S = \sum_{k=1}^9 (y^{(j)}[k] - y^{(i)}[k])^2, \quad (1)$$

где для нашего примера  $S$  – оценка отклонения  $i$  и  $j$  функций по девяти точкам ( $k = \overline{1,9}$ ).

В таблице 2 приведены значения отклонений между функциями-претендентами и в последней строке вычислены значения оценок отклонений всех функций относительно некоторой  $i$ -й функции (суммы  $S$  по столбцам).

Таблица 2

| Функция    | $y^{(1)}$ | $y^{(13)}$          | $y^{(5)}$           | $y^{(11)}$          |
|------------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $y^{(1)}$  | 0         | 0,1204              | 0,1205              | 0,1204              |
| $y^{(13)}$ | 0,1204    | 0                   | $2,6 \cdot 10^{-5}$ | $7,7 \cdot 10^{-7}$ |
| $y^{(5)}$  | 0,1205    | $2,6 \cdot 10^{-5}$ | 0                   | $3,1 \cdot 10^{-5}$ |
| $y^{(11)}$ | 0,1204    | $7,7 \cdot 10^{-7}$ | $3,1 \cdot 10^{-5}$ | 0                   |
| $\sum S_i$ | 0,3613    | 0,12044             | 0,1205              | 0,12047             |

Суть критерия заключается в том, что если некоторая функция лежит в центре распределения пучка, то отклонение других функций-претендентов будет минимальным.

В соответствии с этим, согласно таблице 2, функции-претенденты можно проранжировать следующим образом: 13, 11, 5, 1. И в этом случае, как и в предыдущем, классическая полиномиальная функция  $y^{(1)}$  не является наилучшей.

Можно использовать и другой принцип ранжирования, который заключается в том, что по данным таблицы 2 последовательно выписываются значения оценок расстояний между функциями в порядке возрастания (таблица 3). Далее выписываются номера функций, которые составляют пару для соответствующих оценок расстояний. Для каждой функции-претендента определяется сумма мест в списке. Например, для  $y^{(1)}$ , занимающей места 4, 5 и 6, сумма мест  $\sum N[1]=15$ . Для остальных функций:  $\sum N[5]=11$ ,  $\sum N[11]=9$ ,  $\sum N[13]=7$ . В соответствии с суммой мест функции-претенденты можно проранжировать следующим образом: 13, 11, 5, 1. Практика применения данного *мажоритарного критерия* показывает, что он дает результат, мало отличающийся от результатов *интегрального критерия*.

Таблица 3

| Номер места | S                   | Номера функций |
|-------------|---------------------|----------------|
| 1           | $7,7 \cdot 10^{-7}$ | 11, 13         |
| 2           | $2,6 \cdot 10^{-5}$ | 5, 13          |
| 3           | $3,1 \cdot 10^{-5}$ | 5, 11          |
| 4           | 0,1204              | 1, 13          |
| 5           | 0,1204              | 1, 11          |
| 6           | 0,1205              | 1, 5           |

Комбинацию факторов, воздействующих на КМ, можно рассматривать как точку в факторном пространстве. Причем с позиций математики свойства такого пространства могут быть самыми различными: формализуемыми, например, при непрерывных количественных факторах в виде евклидова или гильбертова пространств и не формализуемыми, например, когда фактор задается по шкале реперов и при этом говорить о каких-либо метрических соотношениях в факторном пространстве бессмысленно. Учитывая специфику физических явле-

ний при структурообразовании КМ, будем рассматривать лишь те факторы, которые можно представить в евклидовом пространстве. Качественные отношения, существующие в факторном пространстве, можно пояснить с помощью диаграммы Венна, приведенной на рисунке 2, где  $E$  – объективное множество всех физических факторов, существующих в природе.

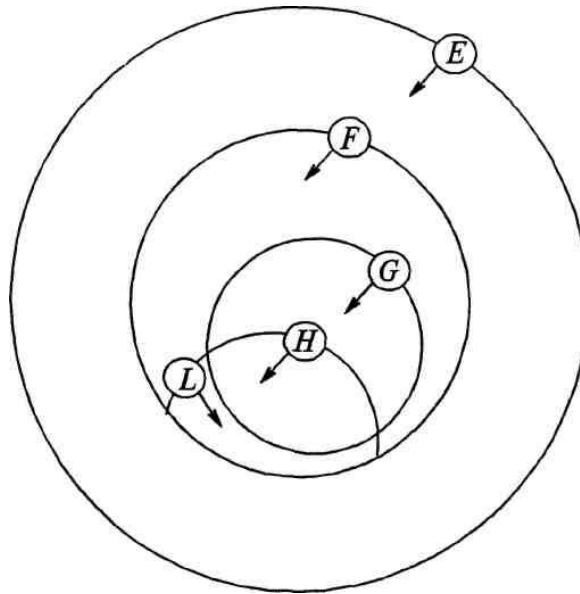


Рисунок 2 – Диаграмма Венна интерпретации ограничений в области планирования эксперимента

Оно включает в себя  $F$ -множество факторов, влияющих на исследуемый объект, которое, в свою очередь, содержит  $G$ -множество факторов, активно учитываемых при планировании эксперимента и составляющих область определения функции отклика. В области определения  $G$  выделяется множество значений факторов  $H$ , являющихся областью планирования, размер которой определяется условиями эксплуатации РЗКМ или задачами исследования. Множество  $L+H$  представляет собой то множество значений факторов, которое реально апостериорно влияет на результаты эксперимента, где  $L$  – множество факторов, не учитываемых в математических моделях при планировании эксперимента.

В практических задачах области определения факторов ограничены. Ограничения здесь могут быть только принципиального характера, обусловленного физическими свойствами материи, т.е. такие ограничения, которые не могут быть нарушены ни при каких обстоятельствах. Например, если фактор – давление, то нижним пределом будет нуль, т.е. абсолютный вакуум, если фактор – температура, то нижний предел – абсолютный нуль.

Список факторов с подобными свойствами достаточно обширен: концентрация, вибрация и давление, напряженность магнитного и электрического полей и т.п. Существуют факторы, принципиально ограниченные как снизу, так и сверху, например наличие примесей интересующих веществ в окружающей среде или материале.

В свою очередь размер области планирования (ее границы) задается требованиями технических условий, в которых эксплуатируется композит, а также целями и задачами исследования. Как показывает практика, не во всех точках области планирования возможно активное воспроизведение эксперимента по получению



значений функции отклика. Здесь возникают ограничения технико-экономического характера, обусловленные дефицитностью приборов и материалов, стоимостью оборудования, отсутствием необходимых приборов, временем проведения эксперимента, невозможностью практической реализации эксперимента и пр.

Характерным примером может служить случай, когда в качестве дестабилизирующих факторов выступают климатические воздействия (температура, влажность и т.п.), вибрации и линейные ускорения. В такой ситуации невозможна реализация даже умозрительного многофакторного эксперимента, поскольку в единый комплекс необходимо объединить такие установки, как центрифугу, вибростенд и климатическую камеру. Возникающие при этом технические трудности более чем очевидны.

Разрешение указанного эксперимента следует искать в иной постановке задачи, а именно в *восстановлении многофакторной функции отклика по результатам двухфакторных и однофакторных экспериментов*. При этом обобщается решение задачи интерполяции, которая традиционно формулируется как задача восстановления функции по известным ее значениям в некоторых узлах. В рассматриваемой ситуации имеется возможность получать информацию о функции отклика в некоторых сечениях, которые могут иметь вид линий, кривых, плоскостей и т.п. Например, на рисунке 3 для случая построения трехфакторной модели условно представлены сечения в виде линий  $ab$  и  $cd$ , вдоль которых можно получить значения функции отклика путем однофакторных экспериментов, и в виде плоского сечения  $efgh$ , в котором поведение функции отклика получается с помощью двухфакторного эксперимента. Таким образом, предлагается задача восстановления не по точкам, а по функциям в известных сечениях.

Следует отметить, что по каждому из сечений функции, естественно, получаются по точкам (такова специфика экспериментальных данных). Но количество таких точек, как правило, может быть достаточным для корректного проведения процедур усреднения и сглаживания с целью определения функций отклика в сечениях.

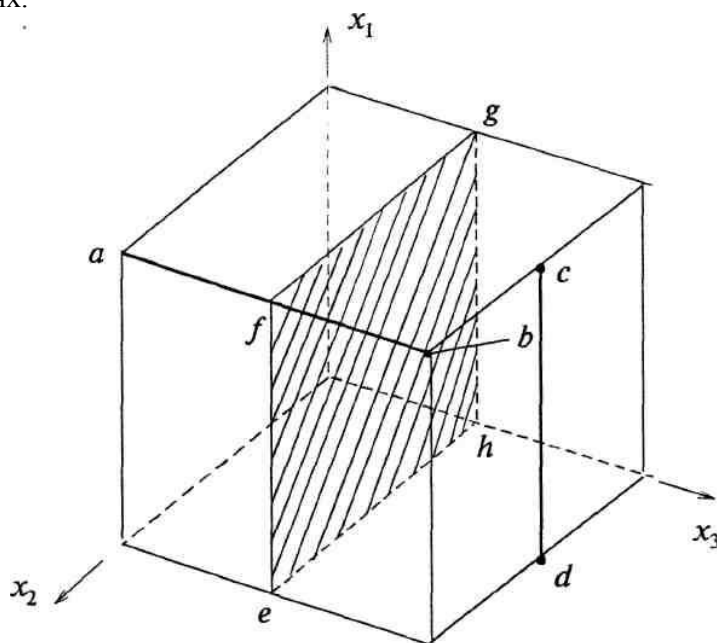


Рисунок 3 – Варианты сечений в области планирования трехфакторного эксперимента

Ограничения на область планирования эксперимента могут быть обусловлены и априорными сведениями о корреляционных свойствах дестабилизирующих факторов. При наличии корреляции факторов резко сужается область планирования. Например, в случае жесткой корреляции двух факторов область планирования вырождается в линию. На рисунке 4 приведен пример поля разброса факторов  $x_1$  и  $x_2$  (реологические параметры композитов – удельная поверхность наполнителя и объемная степень наполнения), где  $ab$  – регрессионная линия, относительно которой показана (при коэффициенте корреляции  $v = 0,98$ ) зона  $\pm 2\sigma$  отклонения факторов от жестко коррелированной зависимости.

В случае трехфакторной области определения и наличия корреляции между двумя факторами область планирования (при положительной корреляции) имеет вид, показанный на рисунке 5.

В данном случае требуется как можно точнее восстановить функцию отклика в сечении 1-7-8-2. При этом необходимо корректно выбирать модель и соответствующий спектр плана, поскольку ограничения в области планирования не упрощают, а усложняют задачу планирования эксперимента. Так, если коррелированы два фактора  $x_2$  и  $x_3$ , в модели

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_1x_3 + a_6x_2x_3 + a_7x_1x_2x_3, \quad (2)$$

сделаем замену  $x_2 = x_3 = x$ :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + (a_2 + a_3)x + (a_4 + a_5)x_1x + a_6x^2 + a_7x_1x^2. \quad (3)$$

Как видно из выражения (3), учитывая корреляцию, требуется строить план эксперимента, исходя из необходимости построения модели 2-го порядка.

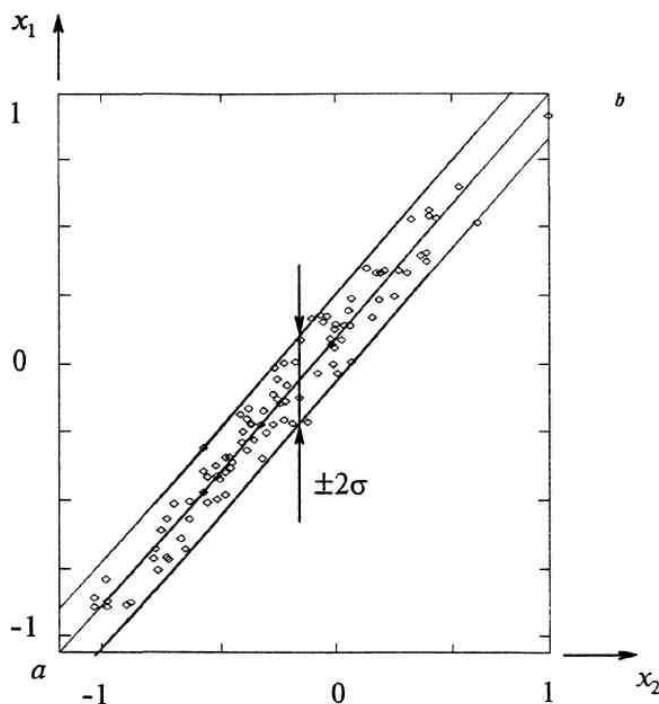


Рисунок 4 – Поле разброса при корреляции двух факторов

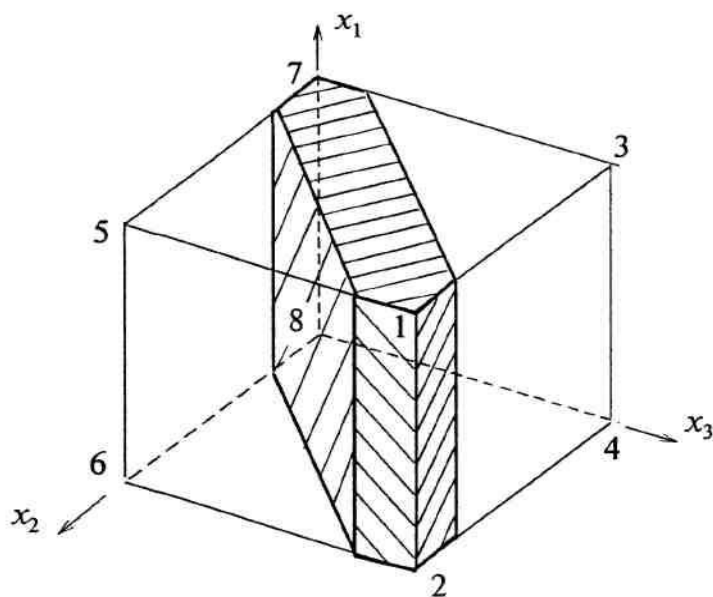


Рисунок 5 – Область планирования при корреляции факторов  $x_2$  и  $x_3$

Упрощение сводится к тому, что требуется определить шесть коэффициентов вместо восьми, но построение моделей высокого порядка также имеет свои сложности.

Данный этап моделирования является заключительным и используется для отыскания функциональных зависимостей в области предельных значений независимых переменных или по краям факторного пространства. Это необходимо для получения адекватных моделей на всем многофакторном пространстве состояний.

Использование комплексного метода построения многофакторных моделей позволяет получать адекватные многофакторные математические модели структурных уровней композита, учитывающих многообразие взаимодействия множества структурообразующих факторов при минимальном расходе ресурсов, основываясь на данных одно- и двухфакторных натурных экспериментов [4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бормотов А.Н. Методологические принципы математического моделирования и синтеза композиционных материалов из отходов нефтепереработки / А.Н. Бормотов, М.В. Кузнецова, Е.А. Колобова // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (38). – С. 85–94.
2. Бормотов А.Н. Теоретические основы математического моделирования композитов из отходов нефтепереработки / А.Н. Бормотов, М.В. Кузнецова, Е.А. Колобова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – Т. 1. – № 09 (13). – С. 173–182.
3. Бормотов А.Н. Методология построения математических моделей наномодифицированных композитов по экспериментальным данным / А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, А.В. Васильков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 6. – С. 28–34.
4. Бормотов А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов / А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, Е.В. Королёв. – Пенза : ПГТА, 2011. – 354 с.

УДК: 661.214.2; 502.3

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
КОМПОЗИТОВ В ВИДЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ  
ПО КРАЕВЫМ ТОЧКАМ ОБЛАСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ**

© А.Н. Бормотов, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© И.А. Прошин, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

© С.В. Тюрденева, Пензенский государственный технологический университет  
(г. Пенза, Россия)

**MATHEMATICAL MODELS COMPOSITES AS A RATIONAL  
FUNCTION OF EDGE SOFTWARE PLANNING**

© A.N. Bormotov, Penza State Technological University (Penza, Russia)

© I.A. Proshin, Ph.D., Penza State Technological University (Penza, Russia)

© S.V. Tyurdeneva, Penza State Technological University, (Penza, Russia)

Предлагается метод математического моделирования композитов на основе многофакторных композитов в виде рациональных функций по краевым точкам области планирования.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, композиционные материалы, синтез многофакторных моделей, численные методы.

We propose a method of mathematical modeling of composites based on multivariate mathematical models of composites in the form of rational functions on the boundary points of the planning area.

**Key words:** mathematical modeling, composite materials, the synthesis of multifactor models, numerical methods.

С математической точки зрения рациональные функции обладают целым рядом преимуществ:

- фундаментальным свойством оставаться рациональными при переносе и растяжении независимой переменной;
- рациональными функциями можно приближать такие функции, которые принимают бесконечные значения для конечных значений аргументов;
- рациональные функции удобно применять при больших диапазонах изменения значений аргументов;
- рациональные функции легко и быстро считаются на ЭВМ [1].

Рациональные функции позволяют описать сложную зависимость с помощью меньшего числа коэффициентов.

Характерной особенностью предлагаемого в данной статье метода является то, что *все модели в виде рациональных функций будут строиться на одном и том же наборе экспериментальных данных*, т.е. решение будет получаться не в виде одной модели (функции), а в виде так называемого **«лучка функций»**.

В связи с изложенным возникает задача построения моделей свойств композиционных материалов (КМ) по краевым точкам области планирования, которые располагаются на ребрах  $n$ -мерного гиперкуба. При этом за основу принимаются хорошо изученные и широко распространенные планы полнофакторных экспериментов типа  $2^k$ , которые модифицируются с учетом указанных ограничений. Проектируемые таким образом планы являются асимптотически к  $2^k$ -планам, и это имеет тот смысл, что при определенных условиях модифицированные планы совпадают с классическими планами типа  $2^k$ , и их свойства по эффективности приближаются к указанным планам. Планы полнофакторного эксперимента типа  $2^k$  служат базой для сравнения.

Для обобщения асимптотических планов типа  $2^k$  рассмотрим случаи  $2^3$ . При этом, как и в планах  $2^2$ , значения  $Y$  будут измеряться только в точках, находящихся на ребрах куба, который задает в данном случае область планирования.

Так, при фиксированных  $x_2$  и  $x_3$  и переменном  $x_1 = \pm \alpha$  имеем [2]:

$$A_{31} = \begin{matrix} & * & * & & * & & & \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ 1 \\ \alpha \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ -\alpha \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \end{matrix} \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & \alpha \\ 1 & -\alpha \end{vmatrix} \otimes A \otimes A. \quad (1)$$

$a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7$

Внизу указаны коэффициенты функции отклика согласно  $Y = a_0 + a_1 x$ .

Аналогично можно составить планы, в которых  $x_2 = \pm \alpha$ :

$$A_{32} = \begin{matrix} & * & * & & * & & & \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \end{matrix} \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & \alpha \\ 1 & -\alpha \end{vmatrix} \otimes A \otimes A \quad (2)$$

$a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7$

и варьируется  $x_3 = \pm \alpha$ :

$$A_{33} = \begin{matrix} & * & * & & * & & & \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ -1 \\ -1 \\ 1 \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \end{matrix} & \begin{matrix} \alpha \\ -\alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ \alpha \\ -\alpha \\ \alpha \\ -\alpha \end{matrix} \end{matrix} = \begin{vmatrix} 1 & \alpha \\ 1 & -\alpha \end{vmatrix} \otimes A \otimes A. \quad (3)$$

$a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7$

Из выражений (1)–(3) следует алгоритм синтеза многофакторных математических моделей свойств композитов специального назначения по крайним точкам из «пучка» функций [3]:

1) матрица базисных функций и соответствующий спектр плана для любого числа переменных строится путем кронекеровского произведения матриц Адамара и матрицы  $\begin{vmatrix} 1 & \alpha \\ 1 & -\alpha \end{vmatrix}$ , причем место сомножителя  $\begin{vmatrix} 1 & \alpha \\ 1 & -\alpha \end{vmatrix}$  указывает на номер переменной, по которой определяются краевые точки;

2) те коэффициенты, которые соответствуют уравниваемым столбцам, определяется с погрешностью  $\sim 1/\alpha^2$ , что учитывается при усреднении;

3) если задаются краевые точки по двум факторам и более, то матрица базисных функций получается аналогично с помощью кронекеровского произведения путем включения соответствующих сомножителей вида  $\begin{vmatrix} 1 & \alpha_i \\ 1 & -\alpha_i \end{vmatrix}$ , где  $i$  – номер фактора.

Покажем методику построения многофакторных моделей эксплуатационных свойств КМ на двух примерах: в случае двух независимых факторов (корреляционная связь отсутствует) и в случае двух факторов с сильной корреляционной связью.

**Пример 1.** Построение многофакторной зависимости предела прочности при сжатии КМ  $R(C_{\text{отв}}, C_{\text{мод}})$  от концентраций отвердителя и модификатора.

Экспериментальные данные приведены в таблицах 1–2 и на рисунках 1–2 [4–7].

Аппроксимация экспериментальных данных проводилась согласно изложенной выше методике при помощи специально разработанного комплекса программ, основу которого составляет структурно-параметрический синтез математических моделей в преобразованных координатах. Результаты аппроксимации показаны на рисунках 3–4.

Таблица 1

|                    |       |        |        |        |        |       |       |        |        |       |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| $R$ ,<br>МПа       | 122,8 | 126,01 | 128,25 | 129,52 | 129,83 | 129,2 | 128,0 | 125,69 | 122,29 | 114,0 |
| $C_{\text{отв}}$ % | 5     | 7,5    | 10     | 12,5   | 15     | 18    | 20    | 22,5   | 25     | 30    |

Таблица 2

|                    |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $R$ ,<br>МПа       | 128,61 | 127,05 | 125,49 | 123,93 | 122,37 | 120,81 | 119,25 | 117,69 |
| $C_{\text{мод}}$ % | 1      | 3      | 5      | 7      | 9      | 11     | 13     | 15     |

Для построения многофакторной модели были выбраны аппроксимирующие зависимости в виде  $y(x) = A \cdot e^x$  при однократном преобразовании координат. Многофакторная модель отыскивалась в виде

$$R(X_1, X_2) = B_0 + B_1 \cdot X_1^* + B_2 \cdot X_2^* + B_3 \cdot X_1^* \cdot X_2^*, \quad (4)$$

где  $X_1^* = e^{X_1}$ ,  $X_2^* = e^{X_2}$ .

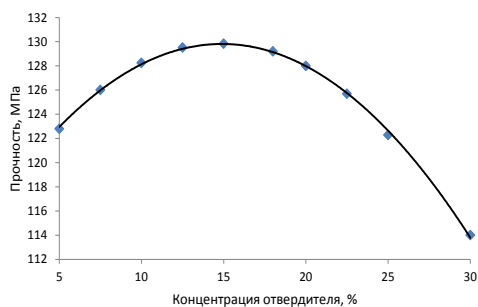


Рисунок 1 – Усредненная экспериментальная зависимость прочности от концентраций отвердителя

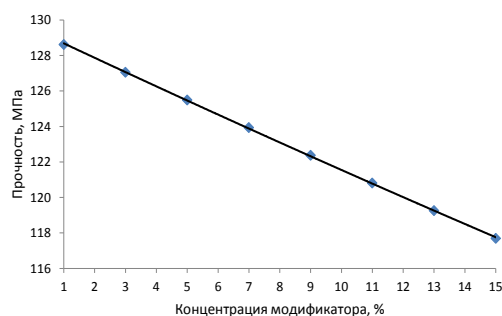


Рисунок 2 – Усредненная экспериментальная зависимость прочности от концентраций модификатора

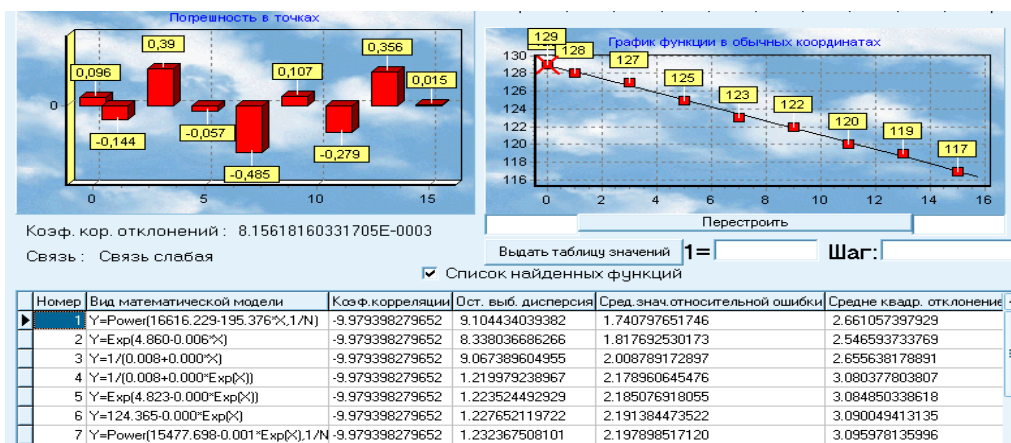


Рисунок 3 – Результат аппроксимации зависимости прочности КМ от концентрации модификатора

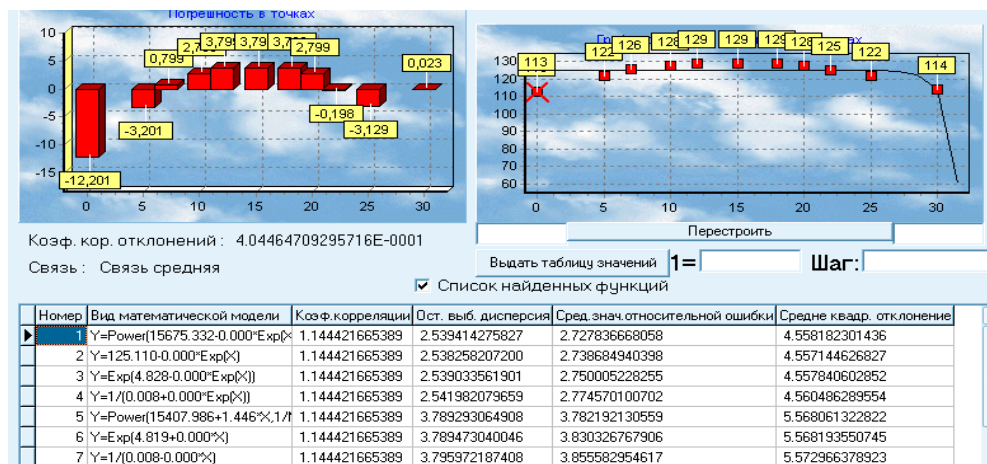


Рисунок 4 – Результат аппроксимации зависимости прочности КМ от концентрации отвердителя

Коэффициенты многофакторной модели отыскивались согласно листингу 1 в системе Mathcad 13.

Листинг 1

$$A := \begin{pmatrix} 1 & e^{30} & e^{15} & e^{45} \\ 1 & e^5 & e^{15} & e^{20} \\ 1 & e^5 & e^1 & e^6 \\ 1 & e^{30} & e^1 & e^{31} \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 1.069 \times 10^{13} & 3.269 \times 10^6 & 3.493 \times 10^{19} \\ 1 & 148.413 & 3.269 \times 10^6 & 4.852 \times 10^8 \\ 1 & 148.413 & 2.718 & 403.429 \\ 1 & 1.069 \times 10^{13} & 2.718 & 2.905 \times 10^{13} \end{pmatrix}$$

$$Y := \begin{pmatrix} 115.845 \\ 120.245 \\ 125.705 \\ 121.305 \end{pmatrix} \quad B := A^{-1} \cdot Y$$

$$B = \begin{pmatrix} 125.705 \\ -4.117 \times 10^{-13} \\ -1.67 \times 10^{-6} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$X1 := 5..30 \quad X2 := 1..15$$

$$R(X1, X2) := 125.705 - 4.117 \cdot 10^{-13} \cdot e^{X1} - 1.67 \cdot 10^{-6} \cdot e^{X2}$$

Графическое отображение многофакторной зависимости прочности от концентраций отвердителя и модификатора показано на рисунке 5.

Полученная многофакторная зависимость позволяет исследовать процессы пластификации и структурообразования радиационно-защитных композитов и провести выбор рецептурно-технологических параметров синтеза мастики (микроуровня моделирования КМ).

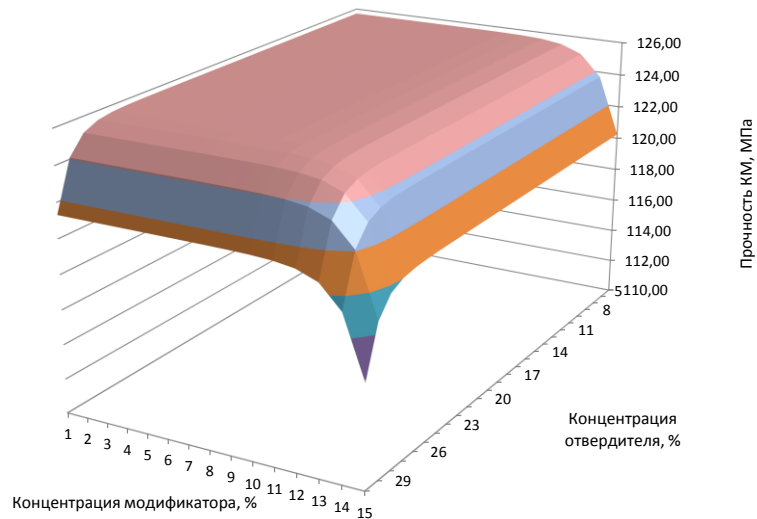


Рисунок 5 – Многофакторная зависимость прочности КМ от концентраций отвердителя и модификатора

**Пример 2.** Построение многофакторной зависимости предельного напряжения сдвига КМ  $\tau(t, \nu_r)$  от времени твердения ( $t$ ) и объёмной степени наполнения ( $\nu_r$ ) при сильной корреляционной связи между факторами. Экспериментальные данные приведены в таблице 3 и на рисунках 6–7 [4–7].

Таблица 3

|      | 5   | 10  | 15  | 20   | 25   | 30   | 35   |
|------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| 0,19 | 40  | 50  | 170 | 1200 | 2400 | 4800 | 9000 |
| 0,54 | 90  | 100 | 130 | 200  | 600  | 1200 | 2500 |
| 0,7  | 120 | 130 | 150 | 180  | 250  | 480  | 1150 |
| 0,78 | 140 | 160 | 220 | 290  | 400  | 640  | 1300 |
| 0,82 | 140 | 170 | 250 | 330  | 440  | 700  | 1380 |



Серым цветом в таблице 3 выделены диапазоны данных, по которым строилась многофакторная зависимость.

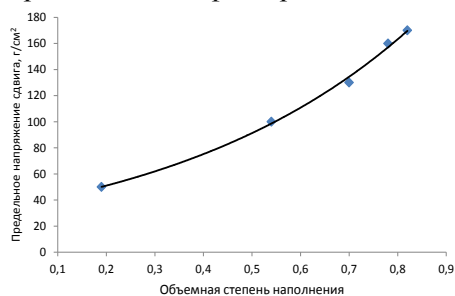


Рисунок 6 – Усредненная экспериментальная зависимость предельного напряжения сдвига КМ  $\tau(v)$  от объемной степени наполнения

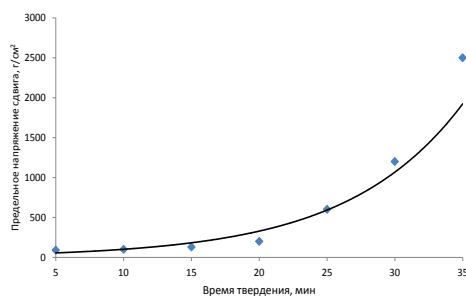


Рисунок 7 – Усредненная экспериментальная зависимость предельного напряжения сдвига КМ  $\tau(t)$  от времени отверждения

На рисунке 8 показана поверхность, построенная по массиву экспериментальных данных.

Аппроксимация экспериментальных данных проводилась согласно изложенной выше методологии при помощи специально разработанного комплекса программ, основу которого составляет структурно-параметрический синтез математических моделей в преобразованных координатах.

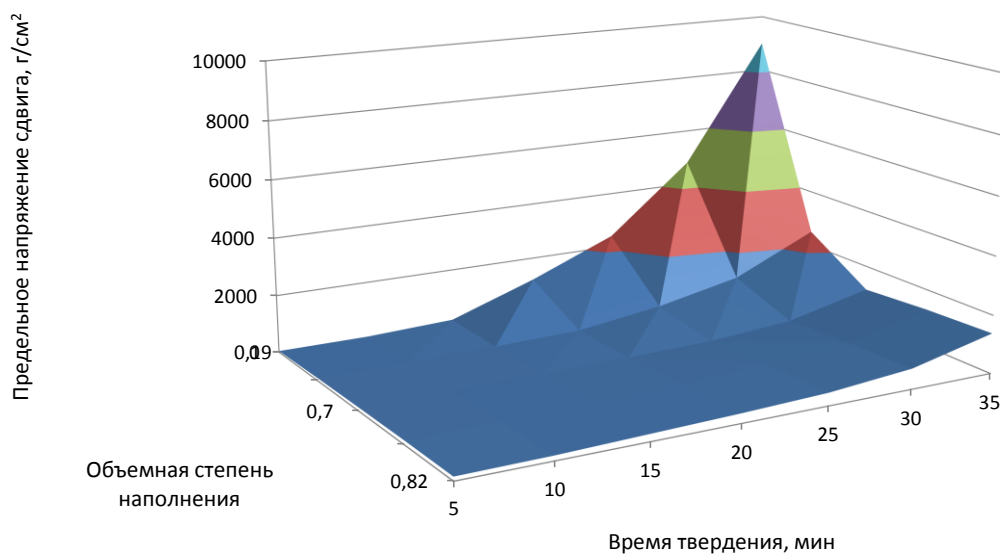


Рисунок 8 – Графическое изображение экспериментальных данных

Результаты аппроксимации показаны на рисунках 9–10.

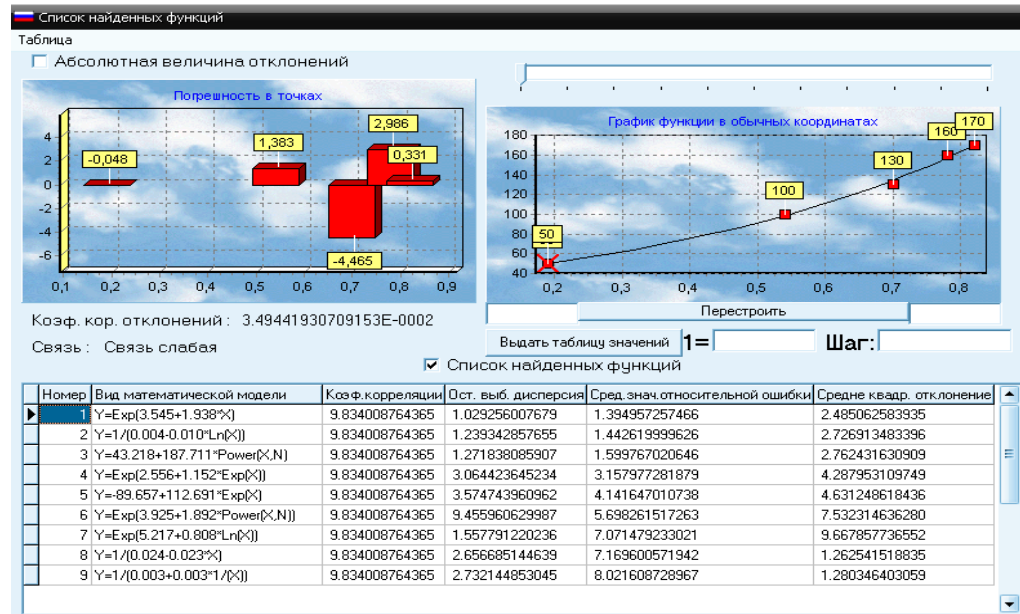


Рисунок 9 – Результат аппроксимации зависимости предельного напряжения сдвига  $\tau(v_f)$  от объёмной степени наполнения

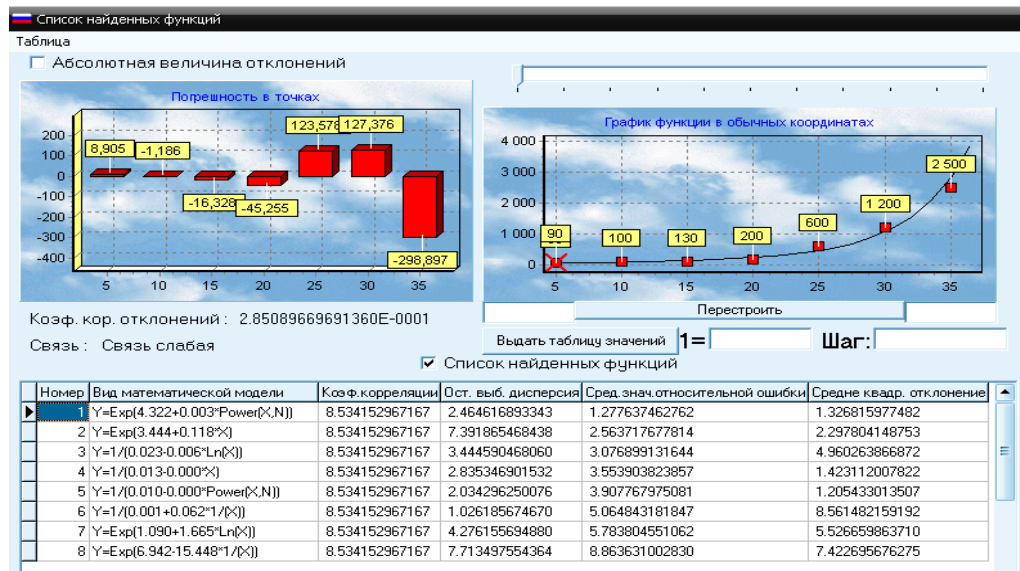


Рисунок 10 – Результат аппроксимации зависимости предельного напряжения сдвига  $\tau(t)$  от времени твердения

Для построения многофакторной модели были выбраны аппроксимирующие зависимости в виде  $\tau(v_f) = e^{(3,545+1,938 \cdot v_f)}$  от степени наполнения и  $\tau(t) = e^{(4,322+0,003 \cdot t^2)}$  от времени при однократном преобразовании координат.

Многофакторная модель отыскивалась в виде

$$\ln \tau(X_1, X_2) = B_0 + B_1 \cdot X_1^* + B_2 \cdot X_2^* + B_3 \cdot X_1^* \cdot X_2^*, \quad (5)$$

где  $X_1^* = (3,545 + 1,938 \cdot X_1)$ ,  $X_2^* = (4,322 + 0,003 \cdot X_2^2)$ .

Коэффициенты многофакторной модели отыскивались согласно листингу 2 в системе Mathcad 13.

$$\hat{A} := \begin{pmatrix} 1 & 5.14 & 7.995 & 41.1 \\ 1 & 5.14 & 4.395 & 22.59 \\ 1 & 3.92 & 4.395 & 17.23 \\ 1 & 3.92 & 7.995 & 31.34 \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 5.14 & 7.995 & 41.1 \\ 1 & 5.14 & 4.395 & 22.59 \\ 1 & 3.92 & 4.395 & 17.23 \\ 1 & 3.92 & 7.995 & 31.34 \end{pmatrix}$$

$$Y := \begin{pmatrix} 7.2 \\ 4.87 \\ 4.25 \\ 7.15 \end{pmatrix} \quad B := A^{-1} \cdot Y \quad B = \begin{pmatrix} -3.513 \\ 1.077 \\ 1.313 \\ -0.13 \end{pmatrix}$$

Графическое отображение многофакторной зависимости предельного напряжения сдвига  $\tau(t, \nu)$  от времени твердения и объёмной степени наполнения показано на рисунке 11.

Полученная многофакторная зависимость позволяет провести адекватное математическое моделирование реологических процессов в КМ и исследовать механизмы структурообразования радиационно-защитных композитов, на основании которых провести выбор рецептурно-технологических параметров синтеза конгломерата (макроуровня моделирования КМ) композита. В последующем данная модель может быть использована в системе компьютерного и имитационного моделирования и синтеза радиационно-защитных композитов.

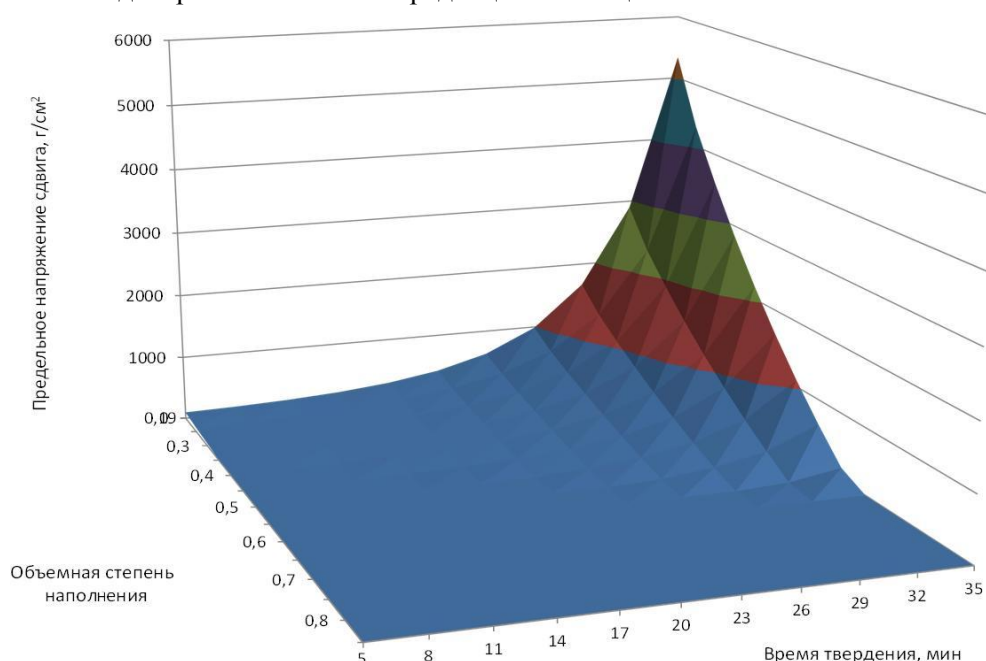


Рисунок 11 – Многофакторная зависимость предельного напряжения сдвига  $\tau(t, \nu)$  от времени твердения и объёмной степени наполнения

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хемминг Р.В. Численные методы для научных работников и инженеров. – М. : Наука, 1972. – 400 с.
2. Райе Дж. Матричные вычисления и математическое обеспечение. – М. : Мир, 1984. – 264 с.

3. Бормотов А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов специального назначения: дисс....д-ра техн. наук: 05.13.18: защищена 21.12.2011: утверждена 30.08.2012: Бормотов Алексей Николаевич. – Пенза, 2011. – 316 с.
4. Бормотов А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез композиционных материалов / А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, Е.В. Королёв. – Пенза : ПГТА, 2011. – 354 с.
5. Бормотов А.Н. Разработка и управление качеством эпоксидных композитов для защиты от радиации / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин, А.М. Данилов. – Пенза : ПГУАС, 2004. – 160 с.
6. Бормотов А.Н. Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации / А.Н. Бормотов, А.П. Прошин, Ю.М. Баженов [и др.]. – М. : Палеотип, 2005. – 270 с.
7. Бормотов А.Н. Пластифицированные эпоксидные композиты повышенной плотности для защиты от радиации: дисс. ...канд. техн. наук: 05.23.05: защищена 21.12.1999: утверждена 15.05.2000 / Бормотов Алексей Николаевич. – Пенза, 1999. – 195 с.

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

---

- © **Абакумов А.А.**, студент, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Авроров В.А.**, д.т.н., Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Артамонов П.И.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Артемьев В.П.**, д.т.н., профессор, Кубанский государственный технологический университет (г. Краснодар, Россия)
- © **Астахова Т.В.**, аспирант, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Ахметов Б.А.**, д.т.н., профессор, Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева (г. Алматы, Республика Казахстан)
- © **Бабич М.Ю.**, д.т.н., Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Бажутина Н.П.**, ООО «Прогрестех» (г. Москва, Россия)
- © **Бормотов А.Н.**, д.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизации и управления, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Бочков А.М.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Булавин В.В.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Бурков В.В.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Бутаев М.М.**, д.т.н., ученый секретарь научно-технического совета ОАО «Научно-производственное предприятие «Рубин» (г. Пенза, Россия)
- © **Васильков А.В.**, аспирант, ОАО «Научно-производственное предприятие «Рубин» (г. Пенза, Россия)
- © **Волков В.В.**, к.т.н., профессор, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Волков П.Ю.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Волков С.В.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Воробьев К.В.**, магистрант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Воячек И.И.**, докт. техн. наук, профессор, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Гарькина И.А.**, д.т.н., профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (г. Пенза, Россия)
- © **Голубовский В.В.** – к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Данилов А.М.**, д.т.н., профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (г. Пенза, Россия)
- © **Данилов Е.А.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

- © **Данишкина Е.А.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Дмитриенко А.Г.**, ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений" (г. Пенза, Россия)
- © **Зайцев В.Ю.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Зверовщиков А.Е.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Зверовщиков В.З.**, д.т.н., Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Иванов А.В.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Колганов Е.А.**, ассистент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Колодяжный М.В.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Коновалова И.И.**, доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Короткова Н.Н.**, доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Косенок Ю.Н.**, д.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Кочерова С.А.**, ст. преподаватель, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Кузнецов В.Е.**, ОАО «Научно-производственное предприятие «Рубин» (г. Пенза, Россия)
- © **Ланщиков А.В.**, д.т.н., профессор, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Липин А.С.**, студент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Михеев А.М.**, аспирант Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Моисеев В.Б.**, д. п. н., профессор, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Найниш Л.А.**, д.т.н., профессор, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства (г. Пенза, Россия)
- © **Нелюдов А.Д.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Николаев В.С.**, доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Никулин С.В.**, аспирант, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Пакулова Н.К.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Паличева А.С.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Папко А.А.**, д.т.н., ОАО "Научно-исследовательский институт физических измерений" (г. Пенза, Россия)
- © **Передрей Ю.М.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

- © **Пижонков С.И.**, магистрант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Поляков И.А.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Понукалин А.В.**, аспирант, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Привалов И.И.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Прохоров С.Г.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Прошин А.И.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Прошин Д.И.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Прошин И.А.**, д.т.н., доцент, зав. кафедрой автоматизации и управления, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Прошина Е.С.**, соискатель, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Прошина Н.Н.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Прошина Р.Д.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Расстегаев А.Н.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Ремонтова Л.В.**, доцент Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Рыжаков В.В.**, д.т.н., профессор Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Рыжаков М.В.**, доцент, Московский физико-технический институт (государственный университет) (г. Долгопрудный, Россия)
- © **Салмов Е.Н.**, ассистент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Сальников И.И.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой “Вычислительные машины и системы”, Пензенский государственный технологический университет, (г. Пенза, Россия)
- © **Сатаева Р.Ф.**, доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Свистунов Б.Л.**, д.т.н., профессор, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Селиверстов А.А.**, ст. преподаватель, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Семёнов А.Д.**, д.т.н., Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Сёмочкина И.Ю.**, к.т.н., доцент, начальник учебно-методического управления ПензГТУ, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Сергеичев А.В.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Симанин Н.А.**, к.т.н., профессор, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)

- © **Таранцева К.Р.**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Биотехнологии и техносферная безопасность» Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Тарасов Д.А.**, соискатель, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Тюрденева С.В.**, аспирант кафедры «Биотехнология и техносферная безопасность», Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Черкунов М.В.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Черкунов М.В.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Чуфистов Е.А.**, канд.техн.наук, профессор, Пензенский государственный университет (г. Пенза, Россия)
- © **Чуфистов О.Е.**, к.т.н., доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Юдина Е.Ю.**, доцент, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)
- © **Якомазов А.А.**, аспирант, Пензенский государственный технологический университет (г. Пенза, Россия)



---

**НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**XXI век: итоги прошлого  
и проблемы настоящего *плюс***

**Периодическое научное издание**

**Серия: Технические науки.**

**Машиностроение и информационные технологии**



Редактор Л.Ю. Горюнова  
Компьютерная верстка Н.Н. Зосимовой

Сдано в производство 13.12.13. Формат 70x108 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага типогр. № 1. Печать трафаретная. Шрифт Times New Roman Cyr  
Усл. печ. л. 23,24. Уч.-изд. л. 26,0. Заказ № 2411. Тираж 88

---

Пензенский государственный технологический университет  
440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1<sup>а</sup>/11