

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№2 2019

Направления:

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

**05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И
МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ**

**05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

Казань

2019

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №2 2019г. – Казань:
ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – 96 с.

ISSN 2079-5920

Журнал зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Журнал размещен в открытом бесплатном доступе на сайте www.ntvp.ru, и в Научной электронной библиотеке (участвует в программе по формированию РИНЦ).

Журнал включен ВАК РФ в перечень научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» № 12025.

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

*С.В. Анаников – д.т.н., проф.; Т.Р. Дебердеев – д.т.н., проф.; Б.Н. Иванов – д.т.н., проф.;
В.А. Жихарев – д.ф.-м.н., проф.; В.С. Минкин – д.х.н., проф.; А.Н. Николаев – д.т.н., проф.;
В.К. Половняк – д.х.н., проф.; П.П. Суханов – д.х.н., проф.; В.Ф. Тарасов – д.ф.-м.н., проф.;
Х.Э. Харлампиди – д.х.н., проф.*

В журнале отражены материалы по теории и практике технических, физико-математических и химических наук.

Материалы журнала будут полезны преподавателям, научным работникам, специалистам научных предприятий, организаций и учреждений, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

УДК 60

ББК 30-1

ISSN 2079-5920

© Научно-технический вестник Поволжья, 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>А.А. Цапаев, В.В. Бронская, Т.В. Игнашина, П.П. Суханов</i> НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ВОДОЙ	7
--	---

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

<i>В.Н. Кудашов, Е.Г. Селина</i> УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ С ПОТЕРЯМИ И УСИЛЕНИЕМ	12
<i>В.Ш. Ройтенберг</i> О ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛАХ УРАВНЕНИЙ, БЛИЗКИХ К УРАВНЕНИЮ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА	15

05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Ф.Д. Байрамов, Б.Ф. Байрамов, А.Р. Фардеев</i> АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДИСКОВОЙ ПИЛЫ В ОТРЕЗНЫХ СТАНКАХ	19
<i>А.П. Буйносов, И.С. Цихалевский</i> РЕМОНТ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЛУЖИВАНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКО-МОТИВА	23
<i>А.А. Владимиров, А.Н. Афонин, А.В. Макаров</i> ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОНЕРОВНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ	27
<i>А.В. Жданов, П.В. Фадеев</i> ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕЗЬБОВЫХ СОПРЯЖЕНИЯХ ПЛАНЕТАРНЫХ РВМ	30
<i>А.Б. Иванченко, А.В. Жданов</i> ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ	34
<i>В.С. Наговицын, А.П. Буйносов, А.Р. Динисламов</i> ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВИНТОВЫХ РЕССОР ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА	38
<i>А.Р. Фардеев, Ф.Д. Байрамов, А.А. Фардеев, Б.Ф. Байрамов</i> ВОЗМОЖНОСТЬ ВКЛЮЧЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КОВКИ ИЛИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВОК	42
<i>З.Р. Фасхиева, Р.М. Хусаинов, С.М. Петров, Г.К. Давлетишина, Ф.Ф. Насыбуллин, Е.В. Стихнин</i> ОБОСНОВАНИЕ РЕНОВАЦИИ ТЯЖЕЛОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ	45
<i>Д.А. Фомин</i> МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИТУАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	48

05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

<i>Н.Н. Беспалов, В.Г. Мясин</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В КОРПУСЕ ТО-220 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИАТОРА	51
<i>О.Ш. Даутов, М.С. Аль-Абади</i> ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ РАБОТЫ ЦЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СФЕРЕ ПОД СЛОЕМ ПЛАЗМЫ	55
<i>И.В. Нелин, М.К. Седанкин, С.Г. Веснин, В.А. Скуратов, М.В. Мартьянова</i> РАЗРАБОТКА МЕДИЦИНСКОЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ТЕКСТИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	61
<i>Ф.Ф. Рамазанов, И.Ф. Рамазанов</i> ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО АНЕМОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ	65

**05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<i>А.Е. Аблаева, В.В. Слепцов, И.В. Таржанов, С.В. Шаныгин</i> АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ЕДИНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ	69
<i>Д.А. Безуглов, В.В. Воронин, С.Е. Мищенко, В.И. Юхнов</i> АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ	73
<i>П.Н. Гаряев</i> БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ	78
<i>С.В. Ерохин, Е.М. Гусакова</i> РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ДРОБНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ	81
<i>Е.А. Серова, Л.А. Шилова</i> РИСКИ ПРИМЕНЕНИЯ ВИМ-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУР	83
<i>Л.А. Шилов, Л.А. Шилова</i> ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СТРОИТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ВИМ-ТЕХНОЛОГИЙ	86

АННОТАЦИИ	89
------------------	----

THE RELEASE MAINTENANCE

<i>A.A. Tsapraev, V.V. Bronskay, T.V. Ignashina, P.P. Sukhanov</i> NEURAL NETWORK MODEL OF THE ABSORPTION PROCESS OF CARBON DIOXIDE WITH WATER	7
--	---

01.01.00 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — MATHEMATICS

<i>V.N. Kudashov, E.G. Selina</i> PLANE OPTICAL RESONATORS STABILITY WITH LOSSES AND AMPLIFICATION	12
<i>V.Sh. Roitenberg</i> ON LIMIT CYCLES OF EQUATIONS CLOSE TO THE EQUATION OF THE HARMONIC OSCILLATOR	15

05.02.00 — TECHNICAL SCIENCES — MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

<i>F.D. Bairamov, B.F. Bairamov, A.R. Fardeev</i> AUTOMATIC REGULATION OF ROTATION SPEED OF THE CIRCULAR SAW IN CUTTING MACHINES	19
<i>A.P. Buinosov, I.S. Tsikhalevsky</i> REPAIR AND MAINTENANCE DURING OPERATION OF THE LOCOMOTIVE	23
<i>A.A. Vladimirov, A.N. Afonin, A.V. Makarov</i> FEATURES OF THE MECHANISM OF FORMING THE SURFACE MICRONEMIC DURING VIBRATION SWITCHING	27
<i>A.V. Zhdanov, P.V. Fadeev</i> FEATURES OF CONTACT INTERACTION IN THREADED MATING PLANETARY RSM	30
<i>A.B. Ivanchenko, A.V. Zhdanov</i> EVALUATION OF THE EFFECT OF RESIDUAL WELDING STRESSES ON THE STATIC STRENGTH OF A WELDED CONNECTION PERFORMED BY LASER WELDING	34
<i>V.S. Nagovitsyn A.P. Buinosov, A.R. Dinislamov</i> SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE USE OF HELICAL SPRINGS FOR RAILWAY ROLLING STOCK	38
<i>A.R. Fardeyev, F.D. Bairamov, A.A. Fardeyev, B.F. Bairamov</i> THE POSSIBILITY OF THE MANIPULATOR INCLUSION INTO THE TECHNOLOGICAL PROCESSES OF PREPARATIONS FORGING OR HOT STAMPING	42
<i>Z.R. Faskhieva, R.M. Khusainov, S.M. Petrov, G.K. Davletshina, F.F. Nasybullin, E.V. Stikhnin</i> JUSTIFICATION OF RENOVATION OF HEAVY METALL-CUTTING EQUIPMENT	45
<i>D.A. Fomin</i> DEVELOPMENT OF ANALYTICAL APPROACH FOR AN EXPERT SYSTEM FOR OPERATING OILFIELD EQUIPMENT SITUATIONS ANALYSIS	48

05.11.00 — TECHNICAL SCIENCES — INSTRUMENTATION, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>N.N. Bespalov, V.G. Myasin</i> THE RESEARCH OF THERMAL PROCESSES OF SEMICONDUCTOR DEVICES IN TO-220 PACKAGE WITH HEATSINK	51
<i>O.Sh. Dautov, M.S. Al-Abadi</i> OPTIMUM CONDITIONS FOR A SLOT ANTENNA OPERATION ON A METAL SPHERE UNDER A LAYER OF PLASMA	55
<i>I.V. Nelin, M.K. Sedankin, S.G. Vesnin, V.A. Skuratov, M.V. Martyanova</i> DEVELOPMENT OF MEDICAL ANTENNA BASED ON TEXTILE TECHNOLOGIES	61
<i>F.F. Ramazanov, I.F. Ramazanov</i> THE USE OF A LASER DOPPLER ANEMOMETER FOR MEASURING FLOW PARAMETERS WITH A HIGH DEGREE OF TURBULENCE	65

05.13.00 — TECHNICAL SCIENCES — COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

<i>A.E. Ablaeva, V.V. Sleptsov, I.V. Tarzhanov, S.V. Shanygin</i> ANALYSIS OF THE ELECTRIC DRIVES SYSTEM WITH A UNIFORM POWER SUPPLY	69
--	----

<i>D.A. Bezuglov, V.V. Voronin, S.E. Mishchenko, V.I. Yukhnov</i> ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ALGORITHM OF ALLOCATION OF CONTOURS OF TELEVISION IMAGES USING A SPLINE-APPROXIMATION	73
<i>P.N. Garyaev</i> BIG DATA IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY	78
<i>S.V. Erokhin, E.M. Gusakova</i> DIFFERENCE SCHEMES FOR CREEP FRACTIONAL DIFFERENTIAL EQUATIONS	81
<i>E.A. Serova, L.A. Shilova</i> RISKS OF USING BIM TECHNOLOGIES IN THE DESIGN OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES	83
<i>L.A. Shilov, L.A. Shilova</i> COMPLEX APPROACH FOR MANAGING THE BUILDING OBJECT'S LIFE CYCLE BASED ON BIM-TECHNOLOGIES	86
ABSTRACTS	89

05.13.18

**А.А. Цапаев, В.В. Бронская канд. техн. наук, Т.В. Игнашина канд. техн. наук,
П.П. Суханов д-р хим. наук**

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
механический факультет,
кафедра процессов и аппаратов химической технологии,
Казань, ighnashina00@mail.ru

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ВОДОЙ

Разработана искусственная нейронная сеть для прогнозирования коэффициентов массоотдачи в жидкой и газовой фазах для процесса абсорбции газа (CO_2) из воздуха абсорбентом - водой. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования обширного класса процессов химической технологии с возможностью формализации расчётных процедур.

Ключевые слова: нейронная сеть, коэффициент массоотдачи, математическое моделирование, процессы химической технологии.

Подходы к решению прикладных задач химической технологии эволюционируют на уровне понимания принципов организации вычислительного процесса. Если традиционные методы – это операции с числами и символами, специализированные по какому либо жесткому алгоритму, то нейросетевое моделирование - направление развития вычислительной математики – оперирует неформализуемыми алгоритмами, которые сами же нейронные сети и находят. Растущая значимость нейросетевого моделирования обусловлена растущим уровнем сложности современных химико-технологических систем и необходимостью детального математического описания [1-3].

По различным научным направлениям ведутся исследования, связанные с применением нейронных сетей для решения прикладных задач. В химии физики и химической технологии искусственные нейронные сети чаще всего применяются для прогнозирования [4], моделирования [5], контроля и принятия решений [6], также для анализа данных [7], классификации [8] и оптимизации [9].

Нейро-сетевой подход в решении задач имеет преимущества в случаях: 1) нет формализации задачи, т.к. содержит элементы неопределенности; 2) формализация задачи есть, но нет математического аппарата для ее решения; 3) формализация задачи есть, математический аппарат есть, но реализация его трудоемка и приводит к упрощению алгоритмов и снижает качество решений.

Целью настоящего исследования является разработка искусственной нейронной многослойной сети прямого распространения, которая находит коэффициенты массоотдачи в жидкой и газовой фазах (на примере процесса абсорбции газа (CO_2) из воздуха абсорбентом-водой).

Был проведен расчет ненаблюдаемых параметров насадочного абсорбера. Разрабатываемая нейронная сеть рассчитывает коэффициенты массоотдачи для газовой и жидкой фаз в стационарном режиме.

Для реализации искусственной нейронной сети при расчете коэффициентов массоотдачи был выбран фреймворк AForge.NET. Для обучения и тестирования нейронных сетей сформированы наборы обучающих и тестирующих пар векторов, для определения входных и выходных переменных (табл. 1).

Таблица 1 - Входные и выходные параметры нейронной сети

Входные	Выходные
Начальная концентрация абсорбтива, y_n	Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, $\beta_{ж}$
Конечная концентрация абсорбтива, y_k	
Объёмный расход смеси, V_0	Коэффициент массоотдачи в газовой фазе, $\beta_{г}$
Температура воды, t	
Давление в абсорбере, P	

Обучающая и тестовая выборки данных были составлены по экспериментальным данным. Обучение нейронной сети более эффективно, когда выполняется нормализация входных и выходных переменных. В качестве нормированных величин входных переменных выбраны нормально-распределенные случайные числа в диапазоне от 0 до 1.

Архитектура искусственной нейронной сети следующая: сеть будет иметь пять нейронов во входном слое, десять в скрытом слое и два в выходном (сеть 5-10-2) (рис.1).

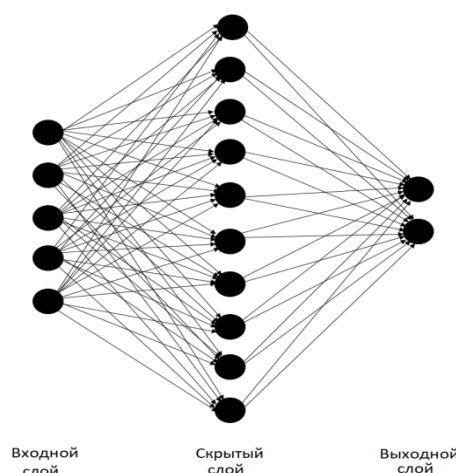


Рис. 1 - Топология нейронной сети

Из множества входных и выходных данных сформированы обучающие и тестирующие векторы. Тестирующие пары представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Тестовая выборка

Вектор входов						Вектор выходов	
№	V_0	y_n	y_k	T	P	$\beta_{г} \cdot 10^3$	$\beta_{ж} \cdot 10^6$
1.	7,1	8,3	0,8	61,4	12,9	0,592485704068183	5,2598494621728
2.	7,3	9,7	0,9	56,6	13,8	0,579046014257464	4,8150089875848
3.	6,7	9	0,8	50,7	12,7	0,639772079982268	5,1676781157875
4.	7,2	9,7	0,6	68,2	11,1	0,611736241326955	6,4204309723738
5.	5,3	8,4	0,7	66,3	14,2	0,534263380473983	4,8078357094432
6.	6,9	8,1	0,7	67,8	10,4	0,654684082129212	6,8477735140176
7.	5,2	7,8	0,8	54,8	14,4	0,578865419035652	4,5312867022008
8.	6,1	9,8	0,8	56,7	13,6	0,580859585765781	4,9080613293260
9.	7,2	7,3	0,7	57	12,7	0,620110224152713	5,2618179912281
10.	6,1	7,8	1	53,1	11	0,711283726312683	6,0633595466088

Для обучения сети задались относительной ошибкой результатов на уровне 0,5%. Рассчитанные значения весовых коэффициентов представлены в таблице 3,4.

Таблица 3 - Скрытый слой W1

№	I=1	I=2	I=3	I=4	I=5
1.	0.025027	0.037251	-0.019779	-0.008142	1.159427
2.	0.367376	1.104361	0.4181876	0.6184764	0.810058
3.	-0.312330	0.215481	0.3601997	0.8885924	0.436505
4.	0.9416578	1.229107	0.8627509	0.5235855	0.656929
5.	0.0016111	0.464742	-0.658497	2.0142734	0.366389
6.	0.4622430	0.824699	0.144913	0.788472	0.712788
7.	0.1692568	1.097325	1.140483	1.054402	0.577029
8.	-0.048560	0.213767	-0.129379	1.889137	-0.572945
9.	-0.133689	-0.078429	-0.117341	-0.405655	9.3679517
10.	-0.545761	-0.263469	0.277923	4.376352	5.2733550

Таблица 4 - Выходной слой W2

№	j=1	j=2
1.	-4.125341	-3.358782
2.	0.9945531	1.1141421
3.	0.6250765	-0.142361
4.	1.3250474	0.9671626
5.	1.8854393	0.6080750

№	j=1	j=2
6.	0.3109761	-0.174296
7.	1.7836284	1.1951391
8.	-2.082939	0.3702943
9.	-2.256111	-5.2937988
10.	-3.221286	0.67391869

С целью выбора архитектуры искусственной нейронной сети были определены отклонения расчетных значений коэффициентов массоотдачи газовой и жидкой фаз от экспериментальных значений (табл. 5). Наиболее оптимальной архитектурой искусственной нейронной сети является архитектура 5-10-2, дающая наименьшее отклонение по $\beta_g, \beta_{ж}$.

Таблица 5 - Входные и выходные параметры нейронной сети

Архитектура	Ошибка β_g	Ошибка $\beta_{ж}$
5-5-2	$4,74752 \cdot 10^{-5}$	$8,11155 \cdot 10^{-7}$
5-6-2	$5,74983 \cdot 10^{-5}$	$6,36088 \cdot 10^{-7}$
5-7-2	$4,70527 \cdot 10^{-5}$	$7,4511 \cdot 10^{-7}$
5-8-2	$6,50883 \cdot 10^{-5}$	$8,27173 \cdot 10^{-7}$
5-9-2	$6,68836 \cdot 10^{-5}$	$9,02349 \cdot 10^{-7}$
5-10-2	$4,59501 \cdot 10^{-5}$	$7,14545 \cdot 10^{-7}$
5-11-2	$5,35965 \cdot 10^{-5}$	$8,31043 \cdot 10^{-7}$

Проверка адекватности нейронной сети эксперименту проводится с помощью критерия Фишера, поскольку принято, что дисперсии для коэффициентов массоотдачи независимы.

Таблица 6 - Критерий Фишера

Критерий	β_g	$\beta_{ж}$
Среднеквадратичная разность модели	0,00027	0,00044
Среднеквадратичная разность эксперимента	0,00011	0,00056
Критерий Фишера, F	2,454	0,785

После обучения были рассчитаны отклики нейронной сети на тестирующие воздействия, которые использовались для проверки адекватности нейронной сети эксперименту. Для $f=9$ при уровне значимости 0,05 критерий Фишера F_T равен 3.169. Так как $F < F_T$ то модель адекватна процессу.

Искусственная нейронная сеть была реализована на языке C# в среде разработки Visual Studio с использованием библиотеки AForge.Neuro [10]. В ходе работы было создано полноценное приложение Windows Forms, в котором выполнены функции загрузки обучающей выборки из файла, задание необходимой точности обучения и ввод вектора для получения результатов работы нейронной сети. Интерфейс приложения представлен на рис. 2. Также был реализован интерфейс для вычисления теоретических значений коэффициентов массоотдачи по известным алгоритмам рис. 3.

Определение коэффициентов массоотдачи

Вычисление теоретических данных | Нейронная сеть

Количество записей в файле

Загрузить обучающую выборку

Количество итераций

Текущая ошибка

Необходимая точность

Обучить сеть

Остановить обучение

V0

Yn

Yk

T

P

B1

B2

Вычислить значения

Рис. 2 - Интерфейс приложения для работы с нейронной сетью

Определение коэффициентов массоотдачи

Вычисление теоретических данных | Нейронная сеть

Входные векторы

V0, м3/с	Yn, %	Yk, %	T, C	P, атм

Выходные векторы

B1, м/с	B2, м/с

Добавить

Загрузить из файла

Сохранить в файл

Очистить

Получить

Рис. 3 - Интерфейс приложения для работы с данными

Заключение. Разработано приложение для прогнозирования коэффициентов массоотдачи процесса абсорбции с помощью искусственной нейронных сетей. Составлены обучающая и тестовая выборки сети составлены по экспериментальным данным, получены отклики нейронной сети. Таким образом, с использованием многослойных нейронных сетей построена нейромодель связи между технологическими факторами и показателями интенсивности процесса.

Список литературы

1. Аминова, Г.А. Оптимальные параметры ведения процесса полимеризации бутадиена при синтезе каучука на неодимсодержащей каталитической системе / Г.А. Аминова, Г.В. Мануйко, Т.В. Игнашина, В.В. и др. // Теоретические основы химической технологии. – 2006. – Т. 40. № 1. – С. 63-71.
2. Мануйко, Г.В. Расчет молекулярно-массового распределения полимера, полученного в каскаде реакторов, с учетом передачи цепи на полимер / Г.В. Мануйко, Г.А. Аминова, В.В. Бронская, Т.В. и др. // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – Т. 42. № 3. – С. 348-351.
3. Аминова, Г.А. Исследование совместно протекающих процессов химического превращения и теплообмена при синтезе каучука СКДК в каскаде из двух реакторов непрерывного действия / Г.А. Аминова, Г.В. Мануйко, Т.В. Игнашина, В.В. и др. // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78. № 3. – С. 115-122.
4. Туманов, В.Е. Применение искусственной нейронной сети для прогноза реакционной способности молекул в радикальных реакциях / В.Е. Туманов // Инф. технол. – 2010. – № 5. – С. 11-15.
5. Zgoul, Moudar H. Use of artificial neural networks for modelling rate dependent behaviour of adhesive materials / Moudar H. Zgoul // Int. J. Adhes. and Adhes. – 2012. – Т. 36. – С. 1-7.
6. Слетнев, М.С. Разработка программного обеспечения системы поддержки принятия решений для управления технологическими установками производства этилена и пропилена на основе нейросетевых технологий // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции. – Уфа, 2010. – С. 89-92.
7. Анализ состояния теплоносителя с помощью искусственных нейронных сетей / П. М. Готовцев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2008. – № 7. – С. 15-20.
8. Charhya, Nadir Nizar Ali Sensor for classification of material type and its surface properties using radial basis networks / Charniya Nadir Nizar Ali, Dudul Sanjay Vasant // IEEE Sens. J. – 2008. – Т. 8, вып. 11-12. – С. 1981-1991.
9. Styrzcz, A. A neural-network controlled dynamic evolutionary scheme for global molecular geometry optimization / A. Styrzcz, J. Mrozek, G. Mazur // Int. J. Appl. Math. and Comput. Sci. – 2011. – Т. 21, вып. 3. – С. 559-566.
10. Документация AForge.NET [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.aforgenet.com/framework/documentation.html>

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА (01.01.00)

01.01.03

В.Н. Кудашов канд. физ.-мат. наук, Е.Г. Селина

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
кафедра информатики и прикладной математики,
Санкт-Петербург, lena_selina@mail.ru

**УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ С ПОТЕРЯМИ И
УСИЛЕНИЕМ**

Рассмотрены комплексные ABCD-преобразования для плоских оптических кольцевых резонаторов с потерями и усилением и условия устойчивости таких резонаторов. Предложен простой метод исследования устойчивости оптических резонаторов. Рассмотрена связь устойчивости резонаторов с матрицами монодромии.

Ключевые слова: *оптический резонатор, устойчивость, ABCD-преобразование, ABCD-матрица.*

1. Введение.

Рассмотрим плоскую оптическую систему первого порядка [1] – [5], в которой ось Z совпадает с оптической осью системы, ось X перпендикулярна оси Z . Функция, описывающая состояние светового поля в окрестности оптической оси системы, имеет вид

$$u^{\pm}(x, z) = a(z) \exp(-i\omega t \pm ikz), \quad (1)$$

$$\tau(x, z) = \tau_0(z) + \gamma(z) x^2/2, \quad (2)$$

где $\gamma(z)$ – комплексная функция. Частота ω в общем случае является комплексным числом. Знак “+” соответствует прямой, а “–” – обратной волнам, распространяющимся в направлении возрастания и убывания координаты z соответственно. Прямая (обратная) волна имеет вид сосредоточенного в окрестности луча гауссова пучка, если $\text{Im } \gamma(z) > 0$ ($\text{Im } \gamma(z) < 0$) при всех значениях z .

Значения $\gamma(z_{\text{in}})$ и $\gamma(z_{\text{out}})$, соответствующие различным значениям переменной z , связаны соотношением

$$\gamma(z_{\text{out}}) = (C + D\gamma(z_{\text{in}})) / (A + B\gamma(z_{\text{in}})), \quad (3)$$

где числа A, B, C, D являются элементами ABCD-матрицы $T = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$, причём $AD - BC = 1$.

1. При отсутствии поглощения и усиления поля матрица T является вещественной. В общем случае матрица T комплексная.

2. ABCD – преобразования

Перечислим используемые ABCD-преобразования (более подробно см. [3], [5]). Матрицы вида

$$S = \begin{pmatrix} 1 & B \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

описывают распространение поля на некоторое расстояние. Например матрица $\begin{pmatrix} 1 & s/n \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ отвечает за распространение поля на расстояние s в среде с показателем преломления n . Если $\text{Im } n > 0$, то среда поглощающая, если $\text{Im } n < 0$, то среда усиливающая.

Матрицы вида

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ C & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

описывают прохождение через гауссову диафрагму, а в композиции с матрицей $\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ отвечает за отражение от искривлённого зеркала.

Заметим, что преобразование, задаваемое матрицей (5), является поглощающим при $\text{Im } C > 0$ и усиливающим при $\text{Im } C < 0$.

Предложение 1. Любую ABCD-матрицу, у которой либо $B \neq 0$, либо $C \neq 0$, можно представить в виде конечного произведения матриц видов (4) и (5).

Это следует из равенств:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (D-1)/B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & B \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ (A-1)/B & 1 \end{pmatrix}, B \neq 0,$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & (A-1)/C \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ C & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & (D-1)/C \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, C \neq 0.$$

Предложение 1 позволяет легко находить резонаторы с данной матрицей монодромии в некотором сечении. Это полезно при разработке примеров.

3. Устойчивость резонаторов

В кольцевом оптическом резонаторе поле u после полного обхода должно переходить само в себя, т.е.

$$u(z+L) = u(z), \quad (6)$$

где L – периметр резонатора.

Резонатор будем называть *односторонне устойчивым*, если существует удовлетворяющее (6), сосредоточенное в окрестности оси резонатора решение u^+ или u^- вида (1). Резонатор будем называть *устойчивым*, если существуют удовлетворяющие (6), сосредоточенные в окрестности оси резонатора решения u^+ и u^- вида (1).

Будем ABCD-матрицу называть *односторонне устойчивой*, если существует решение γ уравнения

$$(C+D\gamma) / (A+B\gamma) = \gamma \quad (7)$$

причём $\text{Im } \gamma \neq 0$.

Будем ABCD-матрицу называть *устойчивой*, если существуют решения $\gamma_{\pm}$ уравнения (7), удовлетворяющие условиям:

$$\text{Im } \gamma_+ > 0, \quad \text{Im } \gamma_- < 0. \quad (8)$$

В случае, если ABCD-матрица вещественна, условия устойчивости сводятся к следующему утверждению.

Предложение 2. Вещественная ABCD-матрица $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ устойчива тогда и только тогда, когда $|A+D| < 2$.

Если ABCD-матрица комплексная, то условия устойчивости выглядят довольно громоздко и мы их приводить не будем (см. [3]).

Предложение 3. В устойчивом резонаторе матрица монодромии устойчива для любого $0 \leq z \leq L$.

В случае если резонатор не содержит усиливающих элементов, то справедливо утверждение, позволяющее легко определять устойчивость.

Предложение 4. Пусть резонатор R не содержит элементов, усиливающих поле. Если в каком-нибудь сечении резонатора R матрица монодромии устойчива, то R устойчив.

4. Примеры

Рассмотрим резонатор R_1 с матрицей монодромии

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Из предложений 2 и 3 следует, что R_1 является неустойчивым резонатором без потерь и усиления. Вставим поглощающую гауссову диафрагму $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,1i & 1 \end{pmatrix}$. Матрица монодромии получившегося резонатора R_2 равна

$$M_2 = \begin{pmatrix} 1+0,1i & 1 \\ 0,1i & 1 \end{pmatrix}.$$

Уравнение (7) имеет решения:

$$\gamma_+ = 0,2208 + 0,1764 i, \quad \gamma_- = -0,2208 - 0,2764 i.$$

Таким образом, условия (8) выполнены и, так как R_2 не содержит усиливающих элементов, резонатор R_2 устойчив в силу предложения 4.

Пусть R_3 является резонатором без потерь и усиления с матрицей монодромии $M_3 = VS$, где

$$V = \begin{pmatrix} 1 & -10 \\ 0,01 & 0,9 \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Таким образом,

$$M_3 = \begin{pmatrix} 1 & -9,5 \\ 0,01 & 0,905 \end{pmatrix}$$

и резонатор R_3 , в силу предложения 2, устойчивый.

Добавим в R_3 две гауссовы диафрагмы, поглощающую и усиливающую:

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,05i & 1 \end{pmatrix}, \quad T_2 = T_1^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -0,05i & 1 \end{pmatrix}.$$

Пусть R_4 соответствующий резонатор с матрицей монодромии

$$M_3 = T_1 V T_2 S = \begin{pmatrix} 1 + 0,5i & -9,5 + 0,25i \\ -0,015 + 0,005i & 0,8925 - 0,4975i \end{pmatrix}.$$

Уравнение (7) имеет решения:

$$\gamma_1 = 0,0038 + 0,0866 i, \quad \gamma_2 = 0,0048 + 0,0186 i,$$

т.е. условия (8) не выполняются. Следовательно, матрица монодромии M_3 неустойчива и из предложения 2 вытекает, что резонатор R_4 тоже неустойчив.

Список литературы

1. Bastiaans M.J. Second-order moments of the Wigner distribution function in the first-order optical systems. *Optik*, 88, № 4, 1991, p. 163–168.
2. Головнин И.В., Ковригин А.И., Коновалов А.Н., Лаптев Г.Д. Описание распространения гауссова пучка со сложным астигматизмом лучевым методом и применение этого метода для расчёта неплоских кольцевых резонаторов, *Квантовая электроника*, 22, № 5, 1995, с. 461–463.
3. Кудашов В.Н., Плаченев А.Б., Радин А.М. Комплексные ABCD-преобразования для кольцевых оптических резонаторов с потерями и усилением, *Квантовая электроника*, 27, № 1, 1999, с. 87–92.
4. Кудашов В.Н., Плаченев А.Б., Радин А.М. Фундаментальная поперечная мода трёхмерного кольцевого резонатора, содержащего селектирующие элементы, *Оптика и спектроскопия*, 93, № 5, 1999, с. 851–859.
5. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки М., Наука, 1990.

01.01.02

В.Ш. Ройтенберг канд. физ.-мат. наук

Ярославский государственный технический университет,
кафедра высшей математики,
Ярославль, vroitenberg@mail.ru

О ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛАХ УРАВНЕНИЙ, БЛИЗКИХ К УРАВНЕНИЮ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

Рассматривается дифференциальное уравнение второго порядка, зависящее от двух малых параметров, совпадающее при нулевых значениях параметров с уравнением гармонического осциллятора, а при нулевом значении только первого параметра являющееся консервативным. Исследуется случай, когда при изменении параметров из замкнутой траектории уравнения гармонического осциллятора может родиться двойной цикл и два грубых цикла.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение второго порядка, малые параметры, фазовое пространство, предельный цикл.

Условия рождения предельных циклов из замкнутых траекторий консервативной динамической системы и, в частности, системы, описывающей гармонический осциллятор, при малых однопараметрических возмущениях хорошо известны [1]. Случай двухпараметрических возмущений, «выводящих» систему из класса консервативных, рассматривался в работах [2, 3]. В настоящей работе будем исследовать двухпараметрические возмущения уравнения гармонического осциллятора и предполагать, что при нулевом значении первого параметра уравнение остается консервативным.

Рассмотрим уравнение

$$\ddot{x} + x = \mu f(x, \dot{x}, \mu, \nu) + \nu g(x, \mu, \nu), \quad (1)$$

где f и g – такие C^2 -функции, соответственно, на $\mathbf{R} \times \mathbf{R} \times (-\delta_0, \delta_0) \times (-\delta_0, \delta_0)$ и $\mathbf{R} \times (-\delta_0, \delta_0) \times (-\delta_0, \delta_0)$, что

$$f(0, 0, \mu, \nu) = g(0, \mu, \nu) = 0, \quad (2)$$

а также автономную систему

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -x + \mu f(x, y, \mu, \nu) + \nu g(x, \mu, \nu). \end{cases} \quad (3)$$

Обозначим

$$J(u) := - \int_0^{2\pi} f(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi d\varphi,$$

$$\begin{aligned} K_1(u) := & 2 \int_0^{2\pi} [f'_x(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi + f'_y(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin^2 \varphi] \times \\ & \times \int_0^\varphi f(u \cos \theta, u \sin \theta, 0, 0) \sin \theta d\theta d\varphi - \\ & - 2 \int_0^{2\pi} [f'_\mu(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi + u^{-1} f^2(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi] d\varphi. \end{aligned}$$

$$K_2(u) := \int_0^{2\pi} (f'_x(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi + f'_y(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin^2 \varphi) \times \\ \times \int_0^\varphi g(u \cos \theta, 0, 0) \sin \theta d\theta + g'_x(u \cos \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi \int_0^\varphi f(u \cos \theta, u \sin \theta, 0, 0) \sin \theta d\theta] d\varphi - \\ - \int_0^{2\pi} [f'_v(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) + g'_\mu(u \cos \varphi, 0, 0)] \sin \varphi d\varphi - \\ - 2 \int_0^{2\pi} u^{-1} g(u \cos \varphi, 0, 0) f(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi d\varphi.$$

Теорема. Пусть при некотором $u_0 > 0$

$$J(u_0) = J'(u_0) = 0, \quad J''(u_0) \neq 0, \quad K_1(u_0) \neq 0, \quad K_2(u_0) \neq 0.$$

Тогда существуют числа $\delta > 0$, $u_- < u_0 < u_+$ и C^1 -функция $\Delta: \Pi \rightarrow \mathbb{R}$ на множестве $\Pi = \{(\mu, \nu): 0 < |\mu| < \delta, |\nu| < \delta\}$ параметров, для которой $\Delta(0, 0) = 0$, $\Delta'_\mu(0, 0) = K_1(u_0)$, $\Delta'_\nu(0, 0) = K_2(u_0)$, такие, что в кольце $u_-^2 < x^2 + y^2 < u_+^2$ система (3) при $(\mu, \nu) \in \Pi$ 1) имеет две замкнутые траектории, если $J''(u_0)\Delta(\mu, \nu) < 0$, и эти траектории грубые; 2) имеет единственную замкнутую траекторию – двойной цикл, если $\Delta(\mu, \nu) = 0$; 3) не имеет замкнутых траекторий, если $J''(u_0)\Delta(\mu, \nu) > 0$.

Доказательство. Перейдем в (3) к полярным координатам. Получим систему

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \mu R_1(\rho, \varphi, \mu, \nu) + \nu R_2(\rho, \varphi, \mu, \nu), \\ \dot{\varphi} = -1 + \mu \Phi_1(\rho, \varphi, \mu, \nu) + \nu \Phi_2(\rho, \varphi, \mu, \nu), \end{cases}$$

где

$$R_1(\rho, \varphi, \mu, \nu) = f(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, \mu, \nu) \sin \varphi, \quad \Phi_1(\rho, \varphi, \mu, \nu) = \rho^{-1} f(\rho \cos \varphi, \rho \sin \varphi, \mu, \nu) \cos \varphi, \\ R_2(\rho, \varphi, \mu, \nu) = g(\rho \cos \varphi, \mu, \nu) \sin \varphi, \quad \Phi_2(\rho, \varphi, \mu, \nu) = \rho^{-1} g(\rho \cos \varphi, \mu, \nu) \cos \varphi.$$

В кольце $0 < a \leq \rho \leq b$ при достаточно малых $|\mu|$ и $|\nu|$ определено уравнение

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = \mu P_1(\rho, \varphi, \mu, \nu) + \nu P_2(\rho, \varphi, \mu, \nu), \quad (4)$$

где

$$P_k(\rho, \varphi, \mu, \nu) = \frac{R_k(\rho, \varphi, \mu, \nu)}{-1 + \mu \Phi_1(\rho, \varphi, \mu, \nu) + \nu \Phi_2(\rho, \varphi, \mu, \nu)}, \quad k = 1, 2. \quad (5)$$

При достаточно малых $|\mu|$ и $|\nu|$ определено его решение $\rho = \bar{\rho}(\varphi, u, \mu, \nu)$, $\varphi \in [0, 2\pi]$, удовлетворяющее начальному условию $\bar{\rho}(0, u, \mu, \nu) = u \in (a, b)$, и задающее дугу траектории уравнения (1) и системы (3). При этом $\bar{\rho}(\varphi, u, \mu, \nu)$ является C^3 -функцией своих аргументов,

$$\bar{\rho}(\varphi, u, \mu, \nu) = u + \mu \bar{\rho}_1(\varphi, u, \mu, \nu) + \nu \bar{\rho}_2(\varphi, u, \nu), \quad (6)$$

где $\bar{\rho}_1$ и $\bar{\rho}_2$ – C^2 -функции своих аргументов. Функция $\bar{\rho}(2\pi, \cdot, \mu, \nu)$ – функция последования по траекториям системы, а функция

$$\bar{d}(u, \mu, \nu) = \bar{\rho}(2\pi, u, \mu, \nu) - u = \mu \bar{\rho}_1(2\pi, u, \mu, \nu) + \nu \bar{\rho}_2(2\pi, u, \nu)$$

– функция расхождения траекторий. Так как при $\mu = 0$ система консервативна, то $\bar{\rho}(2\pi, u, 0, \nu) \equiv u$ и $\bar{d}(u, 0, \nu) \equiv 0$. Следовательно, $\bar{d}(u, \mu, \nu) = \mu d(u, \mu, \nu)$, где $d(u, \mu, \nu) = \bar{\rho}_1(2\pi, u, \mu, \nu)$.

Функция $\bar{\rho}_1(\varphi, u, 0, 0) = \bar{\rho}'_\mu(\varphi, u, 0, 0)$ удовлетворяет уравнению в вариациях

$$\frac{d}{d\varphi} \bar{\rho}_1(\varphi, u, 0, 0) = P_1(u, \varphi, 0, 0). \quad \text{Поэтому}$$

$$\bar{\rho}_1(\varphi, u, 0, 0) = \bar{\rho}'_\mu(\varphi, u, 0, 0) = -\int_0^\varphi f(u \cos \theta, u \sin \theta, 0, 0) \sin \theta d\theta, \quad (7)$$

$$d(u, 0, 0) = -\int_0^{2\pi} f(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi d\varphi = J(u). \quad (8)$$

Функция $\bar{\rho}'_{1\mu}(\varphi, u, 0, 0) = \bar{\rho}''_{\mu\mu}(\varphi, u, 0, 0)$ удовлетворяет уравнению в вариациях

$$\frac{d}{d\varphi} \bar{\rho}'_{1\mu}(\varphi, u, 0, 0) = 2[P'_{1\rho}(\bar{\rho}(\varphi, u, 0, 0), \varphi, 0, 0) \bar{\rho}'_\mu(\varphi, u, 0, 0) + P'_{1\mu}(\bar{\rho}(\varphi, u, 0, 0), \varphi, 0, 0)].$$

Поскольку $\bar{\rho}(\varphi, u, 0, 0) = u$, то

$$\frac{d}{d\varphi} \bar{\rho}'_{1\mu}(\varphi, u, 0, 0) = 2[P'_{1\rho}(u, \varphi, 0, 0) \bar{\rho}'_\mu(\varphi, u, 0, 0) + P'_{1\mu}(u, \varphi, 0, 0)].$$

Отсюда получаем

$$d'_\mu(u, 0, 0) = \bar{\rho}'_{1\mu}(2\pi, u, 0, 0) = 2 \int_0^{2\pi} [P'_{1\rho}(u, \varphi, 0, 0) \bar{\rho}'_\mu(\varphi, u, 0, 0) + P'_{1\mu}(u, \varphi, 0, 0)] d\varphi. \quad (9)$$

Из (5) находим

$$P'_{1\rho}(u, \varphi, 0, 0) = -[f'_x(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi + f'_y(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin^2 \varphi], \quad (10)$$

$$P'_{1\mu}(u, \varphi, 0, 0) = -f'_\mu(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi - u^{-1} f^2(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi. \quad (11)$$

Теперь из (9) – (11) и (7) получаем, что

$$d'_\mu(u, 0, 0) = K_1(u). \quad (12)$$

Функция $\bar{\rho}'_{1\nu}(\varphi, u, 0, 0) = \bar{\rho}''_{\mu\nu}(\varphi, u, 0, 0)$ удовлетворяет уравнению в вариациях

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\varphi} \bar{\rho}'_{1\nu}(\varphi, u, 0, 0) &= P'_{1\rho}(u, \varphi, 0, 0) \bar{\rho}'_\nu(\varphi, u, 0, 0) + P'_{2\rho}(u, \varphi, 0, 0) \bar{\rho}'_\mu(\varphi, u, 0, 0) + \\ &+ P'_{1\nu}(u, \varphi, 0, 0) + P'_{2\mu}(u, \varphi, 0, 0). \end{aligned} \quad (13)$$

Из (5) находим

$$P'_{2\rho}(u, \varphi, 0, 0) = -g'_x(u \cos \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi, \quad (14)$$

$$\begin{aligned} P'_{1\nu}(u, \varphi, 0, 0) &= -f'_\nu(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi - \\ &- u^{-1} f(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) g(u \cos \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P'_{2\mu}(u, \varphi, 0, 0) &= -g'_\mu(u \cos \varphi, 0, 0) \sin \varphi - \\ &- u^{-1} g(u \cos \varphi, 0, 0) f(u \cos \varphi, u \sin \varphi, 0, 0) \sin \varphi \cos \varphi. \end{aligned} \quad (16)$$

Из уравнения в вариациях $\frac{d}{d\varphi} \bar{\rho}'_\nu(\varphi, u, 0, 0) = P_2(u, \varphi, 0, 0)$, используя (5), имеем

$$\bar{\rho}'_\nu(\varphi, u, 0, 0) = -\int_0^\varphi g(u \cos \theta, 0, 0) \sin \theta d\theta. \quad (17)$$

Учитывая, что $d'_\nu(u, 0, 0) = \bar{\rho}'_{1\nu}(2\pi, u, 0, 0)$, из (7), (10), (11), (13) – (17) получаем

$$d'_\nu(u, 0, 0) = K_2(u). \quad (18)$$

Из (8) и условий теоремы вытекает, что

$$d'_u(u_0, 0, 0) = J'(u_0) = 0, \quad d''_{uu}(u_0, 0, 0) = J''(u_0) \neq 0.$$

Следовательно, по теореме о неявной функции существует такая C^2 -функция $m: (-\delta, \delta)^2 \rightarrow (u_-, u_+)$, где $\delta > 0$, $a < u_- < u_0 < u_+ < b$, что $m(0, 0) = 0$, и при всех $u \in (u_-, u_+)$, $(\mu, \nu) \in (-\delta, \delta)^2$

$$\operatorname{sgn} d'_u(u, \mu, \nu) = \operatorname{sgn}[J''(u_0)(u - m(\mu, \nu))], \quad (19)$$

$$d''_{uu}(m(\mu, \nu), \mu, \nu) \neq 0. \quad (20)$$

Обозначим $\Delta(\mu, \nu) := d(m(\mu, \nu), \mu, \nu)$. Тогда $\Delta(0, 0) = 0$, $\Delta'_\mu(0, 0) = K_1(u_0)$, $\Delta'_\nu(0, 0) = K_2(u_0)$. Ввиду (19) $\operatorname{sgn} d(u_-, 0, 0) = \operatorname{sgn} d(u_+, 0, 0) = \operatorname{sgn} J''(u_0)$. Поэтому δ можно считать выбранным так, что

$$\forall \mu \in (-\delta, \delta)^2 \quad \operatorname{sgn} d(u_-, \mu, \nu) = \operatorname{sgn} d(u_+, \mu, \nu) = \operatorname{sgn} J''(u_0). \quad (21)$$

Из (19) – (21) получаем, что $d(\cdot, \mu, \nu)$, а потому и $\bar{d}(\cdot, \mu, \nu)$, при $J''(u_0)\Delta(\mu, \nu) > 0$ не имеет нулей на интервале (u_-, u_+) , при $\Delta(\mu, \nu) = 0$ имеет на (u_-, u_+) единственный двукратный нуль, при $J''(u_0)\Delta(\mu, \nu) < 0$ имеет на (u_-, u_+) два простых нуля. Но это равносильно утверждениям теоремы.

Список литературы

1. Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1967. 488 с.
2. Ройтенберг В.Ш. О бифуркациях замкнутых траекторий при малых двухпараметрических возмущениях гамильтоновых систем на плоскости // Математика и ее приложения: Межвуз. сб. науч. тр. СПб.: Изд. СПГУВК, 2009. С. 8–15.
3. Ройтенберг В.Ш. О предельных циклах второго рода уравнений Лянара с периодическими коэффициентами // Ученые записки Брянского государственного университета: физико-математические науки / биологические науки / ветеринарные науки. 2018, № 3. С. 12–16. URL: <http://scim-brgu.ru>.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ (05.02.00)

05.02.08

¹Ф.Д. Байрамов д-р техн. наук, ²Б.Ф. Байрамов канд. физ.-мат. наук,
³А.Р. Фардеев канд. техн. наук

Набережночелнинский институт (филиал)
Казанского (Приволжского) федерального университета,
кафедра механики и конструирования,
Набережные Челны, ¹fbairamovd@gmail.com, ²bbairamov@gmail.com, ³albert.fardeev@mail.ru

**АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ
ДИСКОВОЙ ПИЛЫ В ОТРЕЗНЫХ СТАНКАХ**

Разработана принципиальная схема гидропривода с автоматическим регулятором скорости вращения дисковой пилы отрезного станка. Регулирование скорости осуществляется за счёт изменения частоты вращения вала электродвигателя насоса. Проведено математическое моделирование динамики и получены условия устойчивости работы гидропривода.

Ключевые слова: *гидропривод для вращения дисковой пилы станка, автоматический регулятор расхода рабочей жидкости, математическое моделирование динамики, устойчивость работы.*

В отрезных станках для главного привода обычно используется электродвигатель постоянного тока, от которого вращение через клиноременную передачу передаётся на коробку скоростей и далее на дисковую пилу. Для предохранения привода от перегрузки связь шкива ременной передачи с входным валом коробки передач осуществляется через фрикционную предохранительную муфту.

Такой электромеханический привод предлагается заменить на гидропривод с автоматическим регулятором расхода рабочей жидкости, а, следовательно, скорости вращения пилы.

На рис. 1 представлена принципиальная схема гидропривода. Он состоит из электродвигателя переменного тока 1, гидронасоса 2, напорного трубопровода 3, гидромотора 4, сливного трубопровода 5, гидробака 6 и регулятора расхода рабочей жидкости. Последний, в свою очередь, включает в себя датчик расхода 7, дифференциальный преобразователь с упругой мембраной 9, электромеханическое преобразующее устройство 10 и частотный преобразователь напряжения 11.

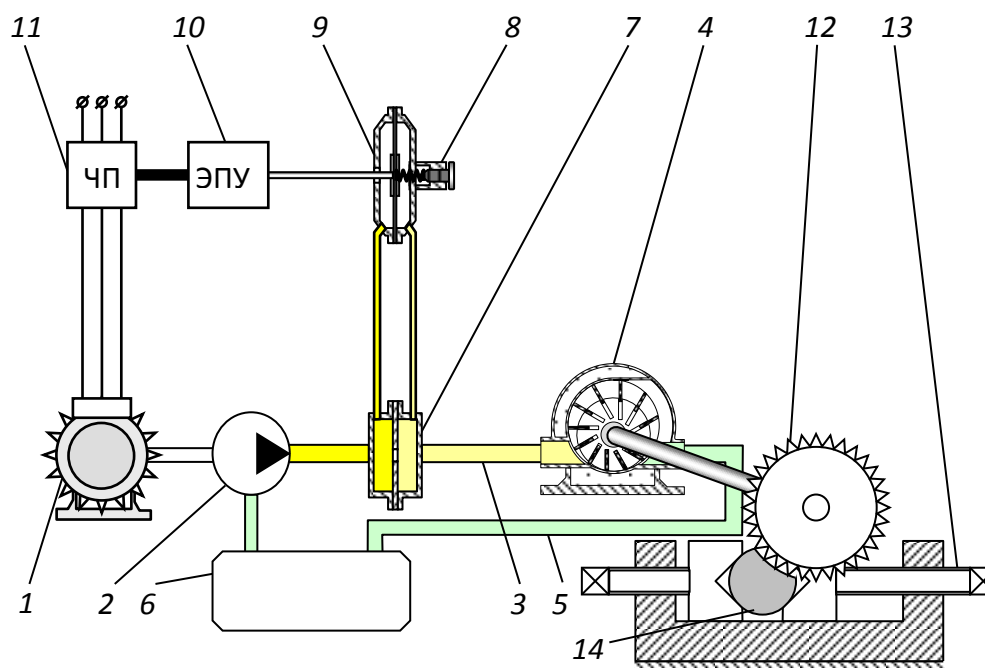


Рис. 1 – Схема привода дисковой пилы в отрезных станках гидроприводом:

1 – электродвигатель; 2 – гидронасос; 3 – напорный трубопровод; 4 – гидромотор;
5 – сливной трубопровод; 6 – гидробак; 7 – датчик расхода; 8 – пружинный задатчик расхода; 9 – дифференциальный преобразователь давления; 10 – электромеханическое преобразующее устройство; 11 – частотный преобразователь; 12 – дисковая пила по металлу; 13 – фиксатор; 14 – заготовка

Регулятор расхода работает следующим образом. Датчик расхода, представляющий собой сужающую диафрагму, измеряет расход жидкости косвенно через перепад давления. Эта разность давления преобразуется в перемещение мембраны дифференциального преобразователя. Мембрана связана штоком с электромеханическим преобразующим устройством, в котором осуществляется преобразование перемещения штока мембраны в напряжение постоянного тока, пропорциональное этому перемещению. Это напряжение управляет частотным преобразователем. Под воздействием этого управляющего напряжения частотный преобразователь, изменяя частоту напряжения питания, регулирует скорость вращения вала двигателя. Таким образом, осуществляется регулирование расхода подаваемой рабочей жидкости, а, следовательно, скорости вращения дисковой пилы. Расчётное значение расхода устанавливается соответствующей затяжкой пружины задатчика 8.

Математическая модель. Уравнения динамики для электродвигателя, насоса, напорного трубопровода, гидромотора, датчика расхода с дифференциальным преобразователем, ЭПУ в отклонениях от номинального режима работы гидропривода соответственно имеют вид [1–3]:

$$2 \cdot \pi \cdot J_D \cdot \frac{d\Delta n}{dt} = \left(\frac{\partial M_D}{\partial n} \right)_* \cdot \Delta n + \left(\frac{\partial M_D}{\partial u} \right)_* \cdot \Delta u - \Delta M_H; \quad (1)$$

$$\Delta p_H = \Delta p_{H0} - \left(\frac{\partial p_H}{\partial G} \right)_* \cdot \Delta G + \left(\frac{\partial p_H}{\partial n} \right)_* \cdot \Delta n; \quad (2)$$

$$\frac{l_T}{F_T} \cdot \frac{d\Delta G}{dt} = \Delta p_H - \Delta p_\Gamma - k_T \cdot \Delta G; \quad (3)$$

$$2 \cdot \pi \cdot J_\Gamma \cdot \frac{d\Delta n_\Gamma}{dt} = \Delta M_\Gamma - \Delta M_C; \quad (4)$$

$$S = k_1 \cdot \Delta G; \quad (5)$$

$$\Delta u = -k_2 \cdot S; \quad (6)$$

где $\Delta n = n - n_*$; $\Delta G = G - G_*$; $\Delta p_H = p_H - p_{H*}$; $\Delta p_\Gamma = p_\Gamma - p_{\Gamma*}$; $\Delta n_\Gamma = n_\Gamma - n_{\Gamma*}$; $\Delta u = u - u_*$; $\Delta M_H = M_H - M_{H*}$; $\Delta M_\Gamma = M_\Gamma - M_{\Gamma*}$; $\Delta M_C = M_C - M_{C*}$; индекс * указывает на значения величин в номинальном режиме; n , n_Γ – частоты вращения вала электродвигателя, гидромотора; G – расход рабочей жидкости в гидроприводе; p_{H0} , p_H – давления на входе в насос и на выходе из него; p_Γ – давление на входе в гидромотор; u – напряжение постоянного тока на выходе ЭПУ, которое является управляющим напряжением для частотного преобразователя; S – смещение мембраны дифференциального преобразователя; k_1 , k_2 – положительные коэффициенты пропорциональности; J_d , J_Γ – суммарные моменты инерции всех тел, кинематически связанных с валом электродвигателя и гидромотора; k_T – коэффициент, характеризующий сопротивление в трубопроводе; l_T , F_T – длина и площадь поперечного сечения трубопровода; M_d , M_H , M_Γ – крутящие моменты электродвигателя, насоса, гидромотора; M_C – момент сопротивления на валу гидромотора.

Момент M_H имеет вид [1] $M_H = \frac{G \cdot (p_H - p_{H0})}{n \cdot \eta \cdot \rho}$, где η – полный КПД насоса; ρ – плотность жидкости. Разлагая функцию M_H в ряд Тейлора в окрестности номинального режима и ограничиваясь членами первой степени относительно малых приращений, найдём:

$$M_H = \left(\frac{\partial M_H}{\partial n} \right)_* \cdot \Delta n + \left(\frac{\partial M_H}{\partial G} \right)_* \cdot \Delta G + \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_H} \right)_* \cdot (\Delta p_H - \Delta p_{H0}). \quad (7)$$

Из выражения момента гидромотора [1] $M_\Gamma = \frac{1}{2\pi} \cdot W_\Gamma \cdot (p_\Gamma - p_{\Gamma0}) \cdot \eta_\Gamma$, где η_Γ , W_Γ , $p_{\Gamma0}$ – механический КПД, объём гидромотора, давление на выходе из гидромотора, получим:

$$\Delta M_\Gamma = \frac{W_\Gamma \cdot \eta_\Gamma}{2 \cdot \pi} \cdot (\Delta p_\Gamma - \Delta p_{\Gamma0}). \quad (8)$$

Расход жидкости G через гидромотор связан с частотой вращения его вала формулой [1] $G = \frac{W_\Gamma \cdot \rho \cdot n_\Gamma}{\eta_O}$, где η_O – объёмный КПД гидромотора. Отсюда

$$\Delta G = \frac{W_\Gamma \cdot \rho}{\eta_O} \cdot \Delta n_\Gamma. \quad (9)$$

В номинальном режиме будем считать, что $M_{d*} = M_{H*} = \text{const}$, $M_{\Gamma*} = M_{C*} = \text{const}$, все переменные постоянные, $S = \Delta u = 0$ и регулятор расхода жидкости находится в нейтральном положении.

Далее будем предполагать $\Delta p_{H0} = \Delta p_{\Gamma0} = 0$, т.е. возмущениями давлений на входе в насос и в сливном трубопроводе пренебрегаем.

Система (1) – (9) описывает динамику гидропривода с гидромотором и регулятором расхода рабочей жидкости. Исключая переменные Δp_H , Δp_Γ , Δn_Γ , Δu , S , эту систему запишем в относительных отклонениях в безразмерной форме:

$$T_d \cdot \frac{dn}{dt} = -a_1 \cdot n - a_2 \cdot g; \quad (10)$$

$$T_T \cdot \frac{dg}{dt} = a_3 \cdot n - a_4 \cdot g - \alpha,$$

$$\text{где } n = \frac{\Delta n}{n_*}; \quad g = \frac{\Delta G}{G_*}; \quad \alpha = \frac{\Delta M_C}{M_{C*}}; \quad T_T = \left(\frac{W_\Gamma \cdot \eta_\Gamma \cdot l_T}{2 \cdot \pi \cdot F_T} + \frac{2 \cdot \pi \cdot J_\Gamma \cdot \eta_O}{W_\Gamma \cdot \rho} \right) \cdot \frac{G_*}{M_{\Gamma*}};$$

$$T_D = \frac{2 \cdot \pi \cdot J_D \cdot n_*}{M_{D*}}; \quad a_1 = \left[- \left(\frac{\partial M_D}{\partial n} \right)_* + \left(\frac{\partial M_H}{\partial n} \right)_* + \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_H} \right)_* \cdot \left(\frac{\partial p_H}{\partial n} \right)_* \right] \cdot \frac{n_*}{M_{D*}};$$

$$a_2 = \left[\left(\frac{\partial M_H}{\partial G} \right)_* + \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_H} \right)_* \cdot \left(\frac{\partial p_H}{\partial G} \right)_* \right] \cdot \frac{G_*}{M_{D*}}; \quad a_3 = \left(\frac{\partial p_H}{\partial n} \right)_* \cdot \frac{W_\Gamma \cdot \eta_\Gamma}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{n_*}{M_{\Gamma*}};$$

$$a_4 = \left[\left(\frac{\partial p_H}{\partial G} \right)_* + k_T \right] \cdot \frac{W_\Gamma \cdot \eta_\Gamma}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{G_*}{M_{\Gamma*}}.$$

Здесь T_D , T_T – постоянные времени электродвигателя и объединённого звена «трубопровод + гидропривод», остальные величины – безразмерные коэффициенты усиления.

Устойчивость. Пусть момент сопротивления на валу гидромотора $M_C = M_{C*} = \text{const}$. Характеристическое уравнение системы (10) при $\alpha = 0$

$$\lambda^2 + \frac{a_4 \cdot T_D - a_1 \cdot T_T}{T_D \cdot T_T} \cdot \lambda + \frac{a_2 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_4}{T_D \cdot T_T} = 0$$

будет иметь корни с отрицательными вещественными частями при выполнении неравенств

$$a_4 \cdot T_D > a_1 \cdot T_T; \quad a_2 \cdot a_3 > a_1 \cdot a_4, \quad (11)$$

которые согласно критерию Рауса – Гурвица, являются необходимыми и достаточными условиями асимптотической устойчивости системы (10), т.е. номинального режима работы гидропривода с гидромотором.

Выводы

Предлагаемый гидропривод по сравнению с существующим электромеханическим приводом имеет ряд преимуществ:

- развивает более высокое усилие, а, следовательно, обеспечивает бóльшую производительность;
- позволяет без применения коробки передач регулировать (причём бесступенчато) скорость резания в широких пределах;
- обеспечивает бóльшую стабильность процесса резания;
- имеет более высокое быстродействие: операции пуска и остановки выполняются значительно быстрее;
- обеспечивает предохранение приводящего двигателя от перегрузок и без предохранительной муфты.

Список литературы

1. Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А. Гидравлика и гидропривод. Ч. 2. Гидравлические машины и гидропневмопривод. – М.: МГИУ, 2005. – 352 с.
2. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
3. Байрамов Ф.Д., Байрамов Б.Ф., Мардамшин И.Г. Математическое моделирование и устойчивость гидравлической системы с ветронасосным агрегатом // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2009. – № 4. – С. 103-106.

05.02.22

А.П. Буйносов д-р техн. наук, И.С. Цихалевский канд. техн. наук

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, byinosov@mail.ru, ITsihalovsky@usurt.ru

РЕМОНТ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЛУЖИВАНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВА

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния применения состава НИОД на повышение ресурса деталей и узлов локомотивов в период их эксплуатации. Выполнен сравнительный анализ долговечности бандажей колесных пар обработанных и необработанных составом НИОД после проведения широкомасштабного эксперимента в шести эксплуатационных локомотивных депо на четырех сериях локомотивов.

Ключевые слова: локомотив, НИОД, эксплуатация, обработка, ремонт, обслуживание, деталь, долговечность.

Техническое обслуживание и ремонт локомотивов в сервисных депо – основная доля затрат на протяжении всего жизненного цикла тепловозов и электровозов, а расходы на капитальный ремонт сопоставимы со стоимостью нового тягового железнодорожного подвижного состава (ТПС). А это значит, что увеличение интервала между капитальными ремонтами, уменьшая при этом их количество, дает значительный экономический эффект, локомотив все время находится «в работе, осуществляет перевозочный процесс, приносит прибыль ОАО «РЖД» [1].

Как правило, основной причиной, требующей ремонта ТПС, является параметрический отказ, т. е. предельный износ поверхности контактирующих деталей. И это, несмотря на то, что техническое обслуживание локомотива 2-го объема (ТО-2) направлено на предотвращение износа (замена смазки, регулировка зазоров и пр.).

Изучению преждевременного износа посвящено большое количество работ, однако, авторы исследований, при этом, допускают упрощенный подход к этому вопросу. Одной из основных причин усиленного износа узлов трения большинства узлов локомотива – различие свойств и прежде всего твердости контактируемых поверхностей деталей. Очевидно, что обеспечить при изготовлении точное совпадение твердости поверхности хотя бы двух деталей практически невозможно, поэтому обычно одну из деталей изготавливают заведомо менее износостойкой, обеспечив, по возможности, простоту замены последней. Таким образом, неизбежность технического обслуживания и ремонта заложена конструктивно в большинство единиц ТПС [2].

Однако возможен принципиально иной подход, позволяющий не только предотвратить наступление параметрического отказа, но и восстановить функциональное состояние изношенных поверхностей деталей ТПС во время эксплуатации, при движении локомотива.

В основе метода лежит процесс направленной ионной диффузии, давший название применяемому при его реализации веществу – НИОД (нанесение ионного покрытия на детали). НИОД – твердое вещество, параметры гексагональной решетки которого близки к аналогичным параметрам одной из гомогенная или квазигомогенная эвтектика составляющих стали, что позволяет ему, при определенных условиях, диффундировать в глубину поверхностного слоя, вызывая упрочнение его дислокации [3].

Рассмотрим подробнее этот процесс на примере обработки НИОДом косозубой зубчатой передачи. В микрообъеме пятна контакта пары «зубчатое колесо–шестерня» возникает давление до 100 МПа. Попадая в зону контакта, внесенные в смазки мелкодисперсные

частицы НИОД воспринимают энергию этого давления, активируются и происходит гетеродиффузия кристаллической решетки сталей, из которых изготовлена зубчатая пара. Основными типами движения диффузионного процесса в зубчатой передаче являются случайные периодические скачки атомов из узла кристаллической решетки НИОД в поверхностные слои трибопары «зубчатое колесо–шестерня». Одновременно происходит процесс микрошлифования поверхностей соприкасающихся зубьев кристаллами НИОД, приводящий к существенному уменьшению шероховатости их поверхностей [4]. Так, очень упрощенно, протекает первая фаза процесса, продолжающаяся до насыщения поверхностных слоев пары «зубчатое колесо–шестерня», при этом поверхностные диффузионные слои отличаются после обработки НИОД от исходного состояния по химическому составу, структуре и свойствам. По ее завершении остаток НИОД удаляют из зацепления, и начинается вторая фаза процесса. Внедрившийся НИОД в поверхность стали под воздействием контактных нагрузок диффундирует вглубь стали зубчатой пары. Происходящие при этом изменения приводят к увеличению размеров зубьев. В отдельных случаях прирост толщины зуба составил 0,3–0,4 мм на сторону, при этом достигается твердость HRC 56–58 и шероховатость поверхности $R_a = 0,12–0,16$ мкм.

Характерной особенностью такого процесса является его способность к саморегуляции, обусловленная тем, что он происходит одновременно на обеих контактирующих поверхностях зубчатого колеса и шестерни под воздействием одной и той же нагрузки. При этом гетеродиффузия НИОД в более твердую поверхность происходит заметно медленнее (шестерни), что приводит в итоге к полному выравниванию микротвердости поверхностных микрослоев сопрягаемых (контактирующих) поверхностей деталей. Одинаковая микротвердость в сочетании с низкой шероховатостью поверхностей приводит к возникновению уникального антифрикционного эффекта. На рис. 1 представлены результаты выполненного в УрГУПС стандартного испытания на машине трения 2070 СМТ-1.

Пары трения: 1 – со смазкой ТАД-17и без обработки НИОД; 2 – со смазкой ТАД-17и, обработанная НИОД; 3 – без смазки, обработанная НИОД. Саморегулирующимся является и процесс роста толщины зуба, продолжающийся до тех пор, пока не будут выбраны существующие радиальные зазоры. Дальнейшее увеличение не происходит, поскольку оно привело бы к значительным деформациям, а, следовательно, нуждается в значительно большей энергии. Способность к саморегуляции открывает широкие перспективы в применении НИОД, его использование позволяет восстанавливать изношенную пару «зубчатое колесо–шестерня», подшипники качения и скольжения, плунжерные пары и ряд других.

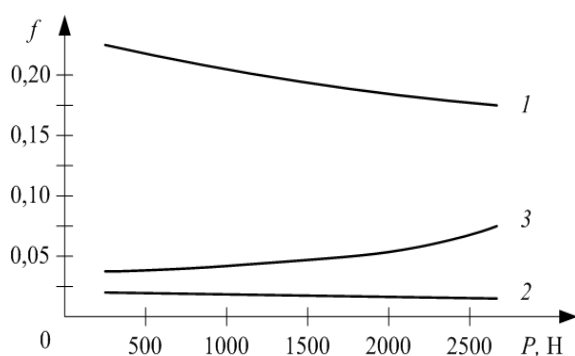


Рис. 1– Результаты стандартного испытания на 2070 СМТ-1:
 f – коэффициент трения;
 P – действующая нагрузка

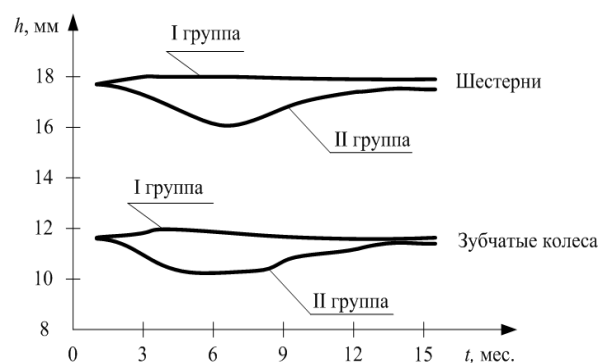


Рис. 2– Результаты измерения редукторов обработанных триботехническим составом НИОД

Высокие антифрикционные свойства образующихся при этом новых поверхностей позволяют значительно снизить энергозатраты (топливо, электрическая энергия и вода), а в отдельных случаях эксплуатировать пары трения локомотива без смазки.

Конечно, приведенная гипотеза очень поверхностно описывает происходящие процессы, поэтому уместно для ее иллюстрации некоторые, наиболее характерные примеры применения НИОД.

Проведенные исследования [5] позволяют судить об эффективности применения триботехнического состава. Электровозы были разделены на две группы. У I-ой группы электровозов малые шестерни и большие зубчатые колеса редукторов были обработаны НИОД, после чего эксплуатировались без смазки. Зубчатые пары II-ой группы электровозов шесть месяцев эксплуатировались со штатной смазкой, после чего были обработаны НИОД и также эксплуатировались без смазки. Замеры проводились в соответствии со штатным регламентом. На рис. 2 приведены усредненные результаты измерений, из которых видно, что применение НИОД существенно увеличивает продолжительность эксплуатации пар трения.

Применение НИОД проверено также и на автомобильном транспорте. После обработки улучшается прилегание компрессионных колец к стенкам цилиндров, восстанавливается поверхность цилиндров, что приводит к существенному увеличению компрессии. Улучшается работа масляного насоса, снижается трение в подшипниках, в том числе, коленчатых валов. Известны случаи, когда после обработки НИОД автомобили эксплуатировались некоторое время без масла в картере двигателя, что не приводило к выходу их из строя.

На основе выполненных экспериментальных исследований и стендовых испытаний были установлены наиболее эффективные конструкторско-технологические решения, наиболее приемлемые для депо, нанесения НИОД на выкружку гребней бандажей колесных пар, что позволило эксплуатировать электровозы до следующей обточки колесных пар без необходимости пополнения НИОД. Обработка гребней колесных пар НИОД позволила увеличить долговечность бандажей на 50–140 % (пассажирские электровозы ЧС2 и ЧС7), и незначительно (2–16 %) грузовых электровозов (ВЛ11 приписки к эксплуатационным локомотивным депо Свердловск-сортировочный, Смычка, Пермь-сортировочная, Ишим Свердловской ж.д. Свердловской дирекции тяги и ВЛ10 приписки к эксплуатационным локомотивным депо Курган, Челябинск Южно-Уральской дирекции тяги), что объясняется наличием гребневых тормозных колодок. НИОД и низкой скорости диффузионных процессов, т. е. отвода атомов НИОД в структуру металла на достаточную глубину, образовавшееся при обработке керамическое покрытие разрушается при воздействии на бандаж тормозной колодки. Было установлено, что толщина диффузионного слоя зависит от температуры окружающей среды, продолжительности выдержки при насыщении и концентрации диффундирующего элемента на поверхности колесной пары [6].

Достижение указанных выше результатов традиционным способом потребовало бы вывода локомотива из эксплуатации на одну-две недели, в то время как с использованием НИОД они были достигнуты в процессе обычной, штатной эксплуатации. Можно предположить, что применение НИОД – является одним из наиболее перспективных и экономичных способов увеличения ресурса ПС и повышения долговечности деталей при эксплуатации локомотива.

Список литературы

1. Буйносов А.П., Цихалевский И.С., Лаптев С.И. Организация эксплуатации, обслуживания и ремонта газотурбовозов ГТ1h // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3 (39). С. 43-55.
2. Буйносов А.П., Лаптев С.И., Антропов С.Н. Организация эксплуатации газотурбинных локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 8. С. 10-13.
3. Буйносов А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения : монография. Екатеринбург: Уральский гос. ун-т путей сообщ, 2009. 224 с.
4. Буйносов А.П., Стаценко К.А. Методика определения величины натяга бандажа на ободу колесного центра локомотива с помощью ультразвуковых импульсов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 4. С. 100-106.
5. Буйносов А.П., Мишин Я.А. Повышение надежности тяговых редукторов электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 3. С. 85-89.
6. Буйносов А.П., Тихонов В.А. Повышение износостойкости колесных пар электроподвижного состава за счет обработки гребней триботехническим составом // Транспорт Урала. 2011. № 3 (30). С. 59-64.

05.02.07

А.А. Владимиров, А.Н. Афонин д-р техн. наук, А.В. Макаров канд. техн. наук

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»,
факультет металлургических и машиностроительных технологий,
кафедра технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта,
Старый Оскол, vladimirov.al.an@yandex.ru, aannru@yandex.ru, makarov.av@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОНЕРОВНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ

В работе представлена схема колебаний режущего инструмента при вибрационном точении. Приведены результаты моделирования микронеровности поверхности при вибрационном точении. Представлены фотографии поверхностей, полученных при обработке вибрационным точением. Указаны факторы, оказывающие влияние на формирование микронеровностей поверхности.

Ключевые слова: *вибрационное точение, амплитуда колебаний, частота колебаний, микронеровности поверхности, шероховатость поверхности.*

Известно, что при обычном точении шероховатость обработанной поверхности формируется за счет перемещения вершины резца в осевом направлении в силу движения подачи. Величина и форма неровностей обработанной поверхности, состоящих из остаточных гребешков, при этом определяется величиной подачи и формой режущего лезвия инструмента. При вибрационном точении механизм формирования шероховатости будет существенно отличаться.

Вибрационное точение с наложением на вершину резца тангенциальных гармонических колебаний маятникового типа включает в себя две составляющие: нормальную A_r и тангенциальную A_t , а траектория колебаний вершины резца поясняется условной схемой, представленной на рисунке 1а [1].

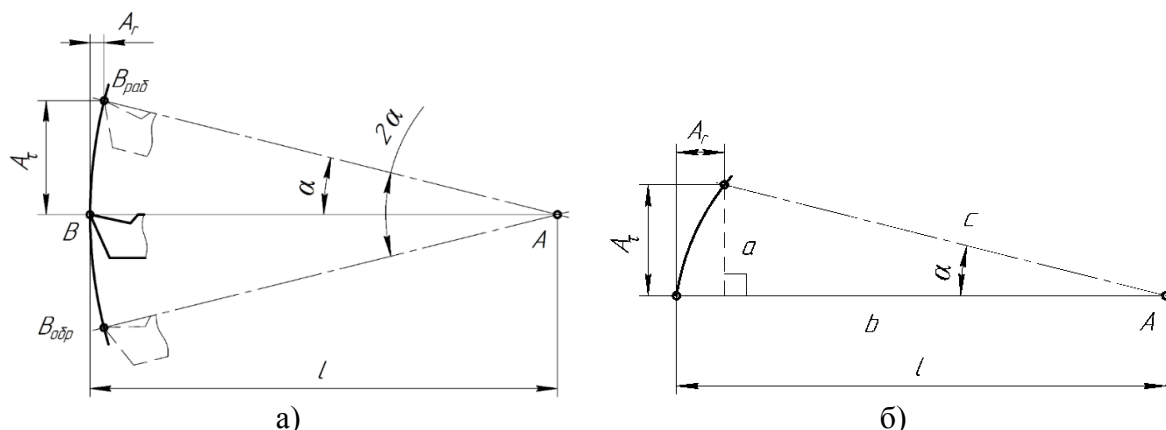


Рис. 1. Траектория колебаний вершины резца:
а – схема колебаний; б – условная схема расчета

Величина амплитуд колебаний не оказывает значительного влияния на изменение значений динамических углов резания и, следовательно, при определении шероховатости поверхности влиянием ее на геометрию инструмента можно пренебречь. Заметным будет лишь влияние колебаний резца на глубину резания.

Представленная схема изменения траектории вершины резца за один период колебаний показала, что основное воздействие колебаний резца на обрабатываемую поверхность происходит в тангенциальном направлении, а вспомогательное в нормальном. Исходя из

того, что тангенциальная составляющая равна амплитуде колебаний и известно значение вылета резца, то нормальная составляющая амплитуды колебаний может быть найдена из прямоугольного треугольника, схема расчета которого представлена на рисунке 1б.

На обработанной поверхности после вибрационного точения можно наблюдать следы колебаний резца, которые представляют собой радиусные впадины, длина которых соответствует значению амплитуды колебаний, а ширина и радиус впадины в поперечном сечении зависит от геометрических параметров инструмента (рис. 2) [2].

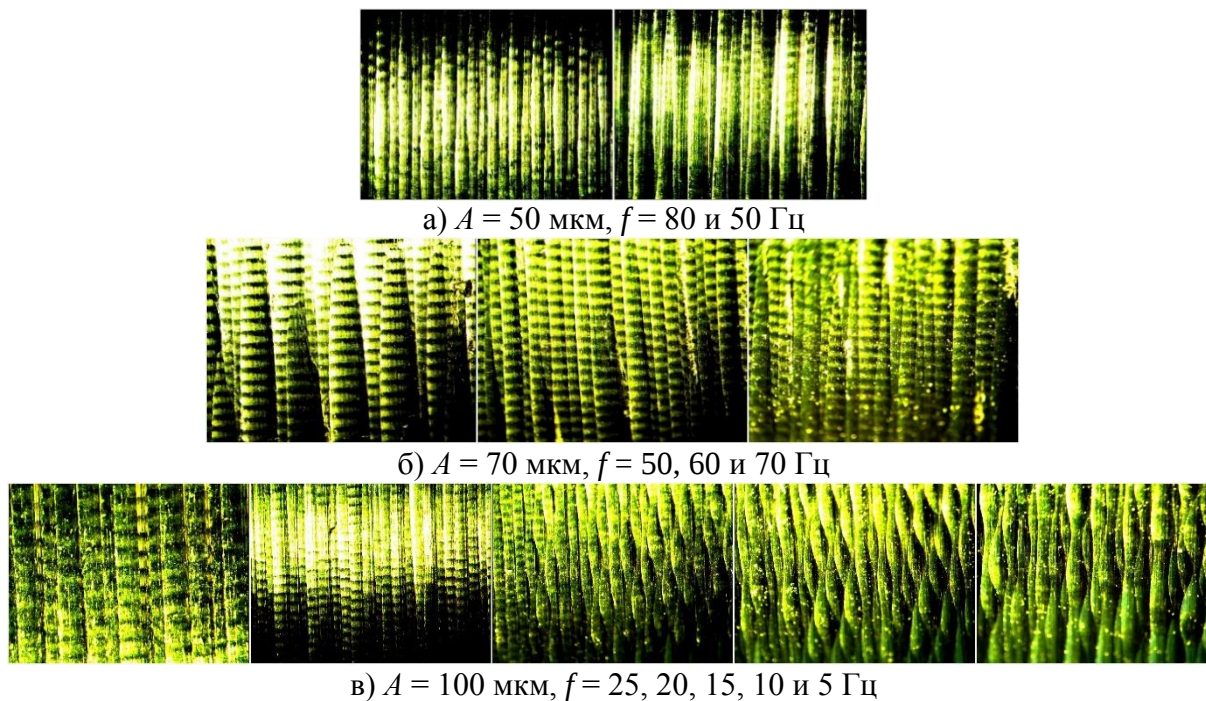


Рис. 2. Следы воздействия нормальной и тангенциальной составляющих на различных режимах вибрационного резания:
а – образец №1; б – образец №2; в – образец №3

Исследуя влияние на образование шероховатости поверхности колебаний резца, необходимо рассмотреть две расчетные схемы формирования профиля шероховатости в плоскости параллельной и перпендикулярной оси заготовки (рис. 3). Первая из них отражает движения обычного точения без наложения колебаний, вторая отражает влияние на кинематику резания колебаний резца и соответствует схеме формирования шероховатости поверхности при фрезеровании цилиндрической фрезой [3]. Наложение этих движений резца в пространстве приведет к снижению шероховатости поверхности по сравнению с обычным точением.

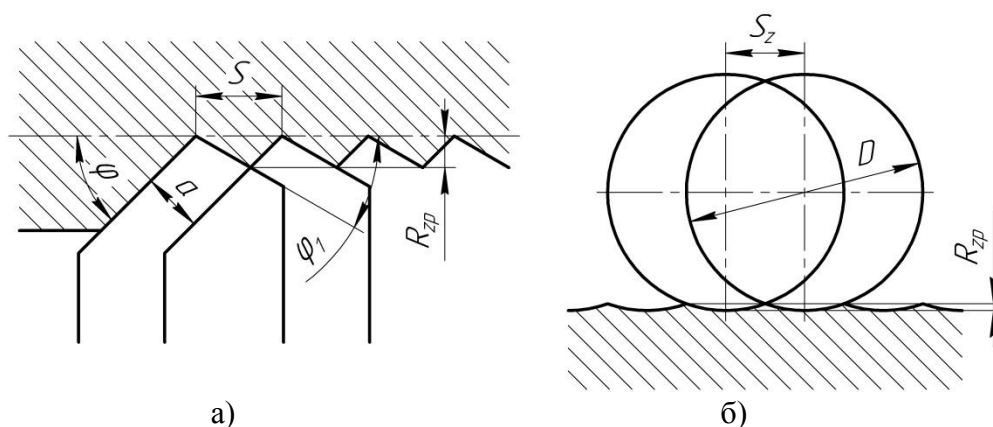


Рис. 3. Схема расчета микропрофиля обработанной поверхности:
а – при точении; б – при фрезеровании

Как видно из рис. 2, поверхность после вибрационного точения имеет шероховатость чешуевидной формы. Смоделировать форму данной шероховатости можно путем 3D моделирования кинематики движения инструмента [4]. Подобные модели, полученные в программе КОМПАС 3D, представлены на рис. 4.

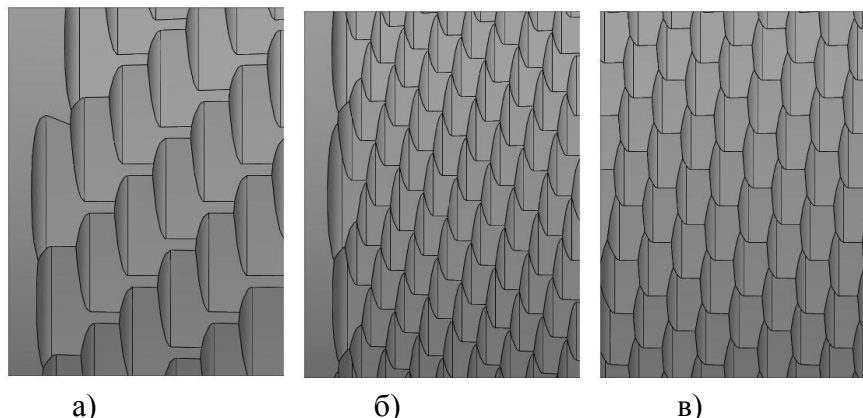


Рис. 4. Форма микронеровности поверхности при 3D-моделировании:
а – при $A = 10$ мкм, $f = 23,9$ Гц; б – при $A = 50$ мкм, $f = 80$ Гц;
в – $A = 70$ мкм, $f = 70$ Гц

Исходя из представленных фрагментов моделей поверхностей, полученных при моделировании виброточения, очевидно, что поверхность формируется за счет комплексного механического воздействия режущим инструментом на обрабатываемую заготовку, включающего продольное движение подачи, тангенциальную и нормальную составляющую колебаний. Такой тип воздействия формирует на заготовке чешуевидный микропрофиль, имеющий элементы, характерные как для точения, так и для фрезерования. Однако, стоит отметить, что такой характер формирования микронеровности поверхности возможен лишь при определенных сочетаниях режимов резания и амплитудно-частотных характеристик тангенциальных маятниковых колебаний.

Для осуществления комплексного влияния режимов резания и амплитудно-частотных характеристик вибрационного точения необходимо соблюдение следующих условий:

- соблюдение минимального соотношения частоты вращения заготовки и колебаний режущего инструмента, которое составляет 1:5;
- оптимальная амплитуда колебаний режущего инструмента находится в диапазоне от 50 до 100 мкм.

В результате установленных зависимостей вибрационного точения на формирование микронеровностей поверхности были сформулированы дальнейшие задачи исследований, которые заключаются в определении оптимального диапазона соотношений частоты вращения заготовки и колебаний резца.

Список литературы

1. Сергиев А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В., Швачкин Е.Г. Физические основы процесса вибрационного резания при точении // Научно-теоретический журнал Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 3. – С. 94 – 102.
2. Сергиев А.П., Владимиров А.А., Швачкин Е.Г. Исследование влияния амплитудно-частотных характеристик вибрационного точения на параметры шероховатости // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. – Ч. 2 / редкол.: С. Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – С. 15 – 17.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. – М.: Изд. Машиностроение, 1975. – 344 с.
4. Киричек А.В., Афонин А.Н., Иванов К.В. Геометрическое моделирование процессов обработки давлением с локальным контактом инструмента и заготовки // Кузнечно-штамповочное производство. – 2004. – № 9. – С. 21 – 25.

05.02.02

А.В. Жданов канд. техн. наук, П.В. Фадеев

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»,
Владимир

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕЗЬБОВЫХ СОПРЯЖЕНИЯХ ПЛАНЕТАРНЫХ РВМ

В статье проводится анализ контактного взаимодействия в резьбовых сопряжениях роликовинтовых механизмов. На основе метода конечных элементов проанализированы форма и размеры площадки контакта в сопряжении винт-ролик в зависимости от соотношений углов подъема резьб, определены величины смещения пятна контакта по витку, проведено уточнение контактных напряжений в пятне.

Ключевые слова: *роликовинтовой механизм (РВМ), контактные напряжения, площадка контакта.*

Расчет прочности, долговечности и нагрузочной способности РВМ основан на нахождении площадки контакта и контактных напряжений на основе задачи Герца [1]. В РВМ встречаются различные варианты сопряжения резьбовых элементов, которые зависят от соотношения углов подъема λ . Ранее в [2] предложена комплексная модель контактного взаимодействия в РВМ на основе численного решения, однако вызывает интерес форма и размеры пятна контакта в сопряжениях винтовых звеньев РВМ. В данном исследовании приводится численное решение контактной задачи на основе метода конечных элементов (КЭ).

В моделях задавалось контактное взаимодействие между резьбовыми поверхностями винта и ролика. Исходные параметры исследуемого механизма: $d_e = d_p = 12$ мм - средний диаметр винта и ролика, $p_x = 1$ мм - шаг резьбы, максимальная нагрузка на передачу $F = 10$ кН, материал витков – сталь ШХ15. При расчете на прочность решается контактная задача в наиболее нагруженном сопряжении винт-ролики.

При решении рассматривался контакт двух сопрягающихся витков при максимальной нагрузке. Сопряжение ролики-гайка в РВМ не является критическим с точки зрения прочности, поскольку радиусы кривизны гайки значительно отличаются от радиусов кривизны винта и роликов. На рис. 1 представлены твердотельные и КЭ-модели сопрягающихся резьбовых витков. При приложении нагрузки полагаем, что один виток закреплен неподвижно, а другой нагружается по торцевой поверхности. Витки первоначально контактируют в одной точке (PNT 1). Нагрузка направлена вдоль оси вращения винта. Углы подъема витков бывают правыми и левыми и могут изменяться от 0^0 до 10^0 .

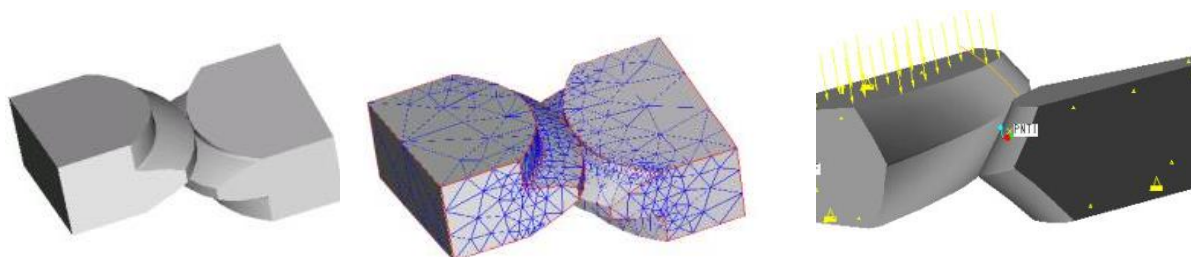
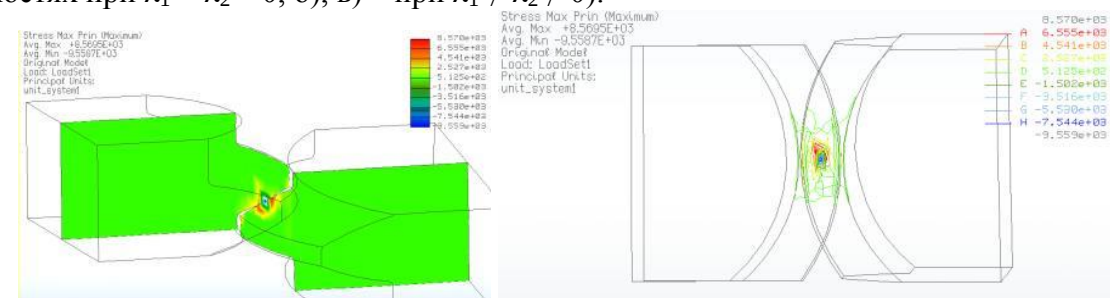
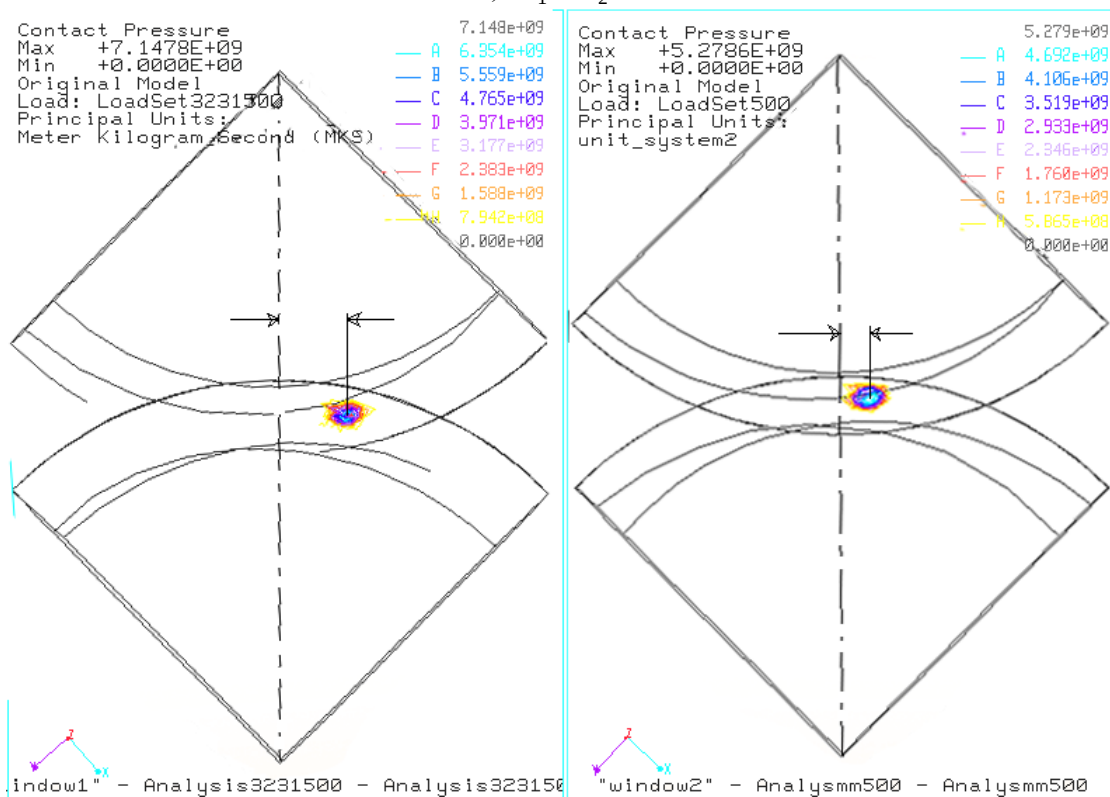


Рис.1. Твердотельная, КЭ-модель и схема нагружения сопряжения резьбовых витков винта и ролика РВМ

Результатами расчета являются поля напряжений и деформаций сопрягающихся витков (можно рассчитать геометрические и силовые параметры, в т. ч. максимальное, среднее контактное давление, максимальную нагрузку и площадь пятна контакта, упругие деформации, эквивалентные напряжения в теле витков и т.д.). Объемное НДС для рассматриваемых витков (половина витков) показано на рис.2 (а - в осевой и торцовой плоскостях при $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$, б), в) - при $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq 0$).



а) $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$



б) смещение пятна $s = 1,066$ мм
 $\lambda_1 = 10^\circ$ град

в) смещение пятна $s = 0,42$ мм
угол подъема $\lambda = 1$ град

Рис. 2. Объемное НДС витков РВМ

Анализ полей напряжений показывает, что их наибольшая величина наблюдается в месте контакта, и достигает для предельных допускаемых значений при определенной нагрузке. Впервые показано, что пятно контакта смещается вдоль оси средней линии витка на расстояние l с увеличением угла подъема резьбы. На основе полученных числовых расчетов были получены зависимости параметров контакта РВМ от геометрических характеристик передачи. Размеры площадки контакта и максимальные контактные давления представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Размеры площадки контакта и максимальные контактные давления в РВМ в зависимости от нагрузки на виток

Нагрузка на виток, Н	Радиус кривизны, мм		Площадь пятна контакта, мм ²	Максимальное контактное давление, МПа
	1 виток	2 виток		
500	2,75	2,75	0,036	144
1000	2,75	2,75	0,041	185
500	2,92	2,92	0,054	143
1000	2,92	2,92	0,070	183
500	2,92	-5,80	0,062	122
1000	2,92	-5,80	0,085	143

Было проведено сравнение полученных результатов методом КЭ и аналитических решений [1, 3-5]. Показано, что контактные напряжения, полученные методом КЭ на 10...18% выше, чем результаты, полученные аналитическим способом. Это связано, очевидно, с уточнением размеров площадки контакта и учетом смещения пятна контакта по витку, что не было учтено в аналитических расчетах. В качестве подтверждения этой гипотезы на рис. 3 представлены форма и размеры площадки контакта при различных сочетаниях углов подъема резьбы винта и ролика РВМ, а на рис.4 – график смещения пятна контакта в зависимости от угла подъема винта.

На основе полученных результатов были скорректированы проектировочные расчеты РВМ, на основе которых назначаются параметры резьбы: шаг, угол профиля в осевом сечении, средний диаметр резьбовых элементов (винта, роликов и гайки).

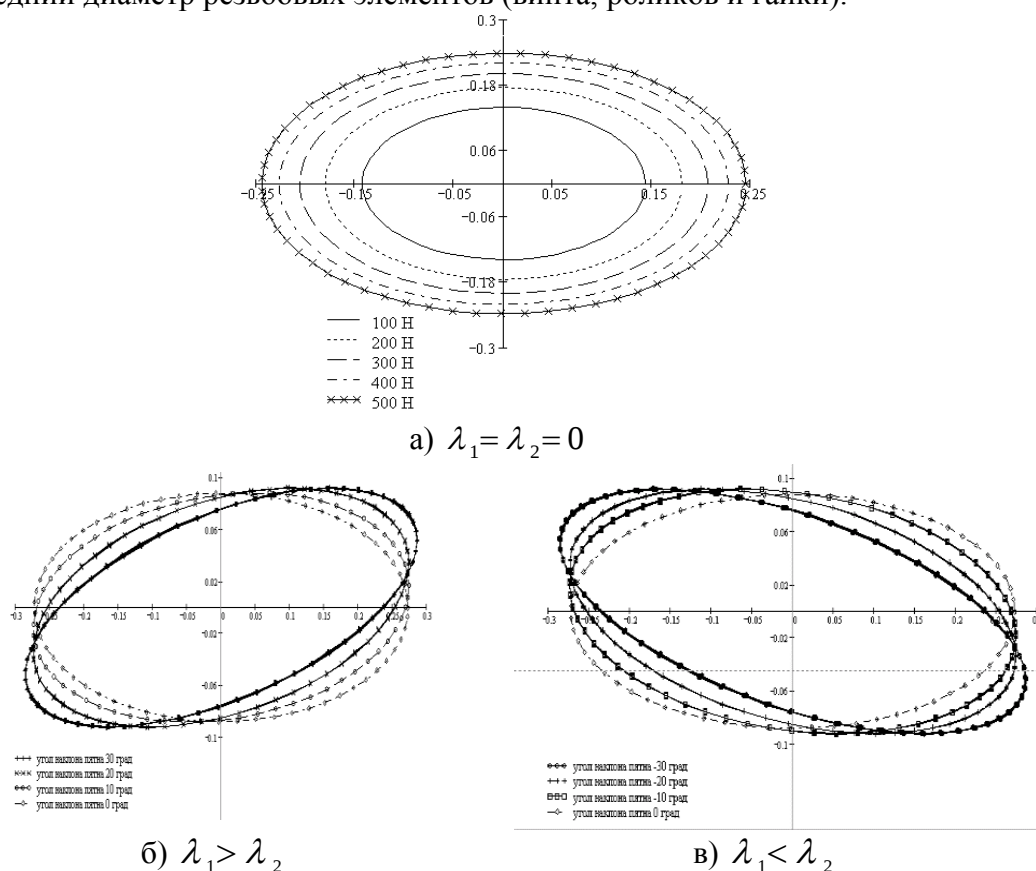


Рис.3. Форма и размеры площадки контакта при различных сочетаниях углов подъема резьбы винта и ролика РВМ

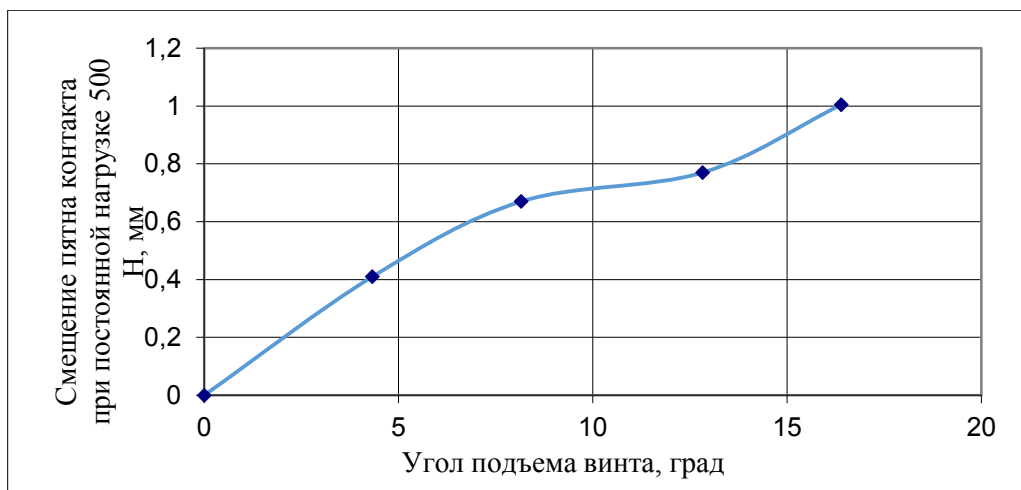


Рис. 4. Влияние угла подъема резьбы на смещение пятна контакта в РВМ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-20-03084офи_м_РЖД, 16-48-330038 p_a, 9.11716.2018/11.12.

Список литературы

1. Морозов, В.В., Жданов, А.В. РВМ. Надежность и долговечность: монография. М.: Изд-во «Перо», 2015, - 152 с.
2. Жданов, А.В. и др. Определение напряжений и деформаций в контакте звеньев РВМ методом конечных элементов // Научно-технический вестник Поволжья, 2018, №12, с.75-78
3. Shangjun, Ma et al. A New Study on the Parameter Relationships of Planetary Roller Screws // Mathematical Problems in Engineering Volume 2012, Article ID 340437, 29 pages doi:10.1155/2012/340437
4. Xiaocai, Zhang, et al. Study on Axial Contact Deformation of Planetary Roller Screw // Applied Mechanics and Materials Online: 2012-02-27 ISSN: 1662-7482, Vols. 155-156, pp 779-783 doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.155-156.779
5. Yousef Hojjat *, M. Mahdi Agheli A comprehensive study on capabilities and limitations of roller-screw with emphasis on slip tendency // Mechanism and Machine Theory 44 (2009) 1887–1899

05.02.02

А.Б. Иванченко канд. техн. наук, А.В. Жданов канд. техн. наук

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
Владимир, tms@vlsu.ru, zhdanov@vlsu.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ СВАРКОЙ

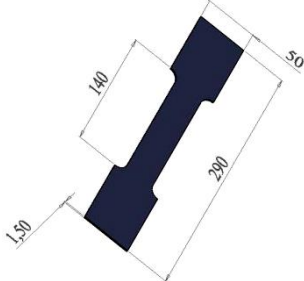
В статье описана методика для определения остаточных сварочных напряжений в условиях лазерной сварки. Проведена оценка их влияния на статическую прочность сварного соединения. Результаты экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность предложенных моделей.

Ключевые слова: *лазерная сварка (ЛС), остаточные сварочные напряжения (ОСН), метод конечных элементов (КЭ).*

Сварные соединения широко применяются в современной технике. ОСН, возникающие на разных стадиях технологического процесса изготовления конструктивных элементов, часто оказывают значительное негативное влияние на статическую и усталостную прочность конструкций. Точный расчет действительного распределения ОСН на стадии проектирования сварных конструкций и определения технологических параметров сварочного процесса открывает новые возможности повышения эксплуатационной надежности сварных конструкций. Прогресс в этом направлении зависит от наличия надежных расчетных методик определения ОСН в зонах термического влияния сварных швов (СШ) и их воздействие на статическую и усталостную прочность конструкций в условиях эксплуатации.

Растягивающие ОСН, концентрация напряжений, вносимая сварным соединением, существенно снижают статическую прочность соединения, что подтверждают сравнительные испытания на разрыв сварных и цельных образцов из стали 3 ГОСТ 19903-74 на испытательной машине WDW-100E. Результаты испытаний и геометрические характеристики образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1- Сравнительные прочностные характеристики сварных и цельных образцов из стали 3 ГОСТ 19903-74

	Цельный образец							
	№ образца	1	2	3	4	5	Среднее значение	
	Предел прочности, МПа, σ_B	448	413	442	403	441	429	
	Сварной образец							
№ образца	1	2	3	4	5	6	7	Среднее значение
Предел прочности, МПа, σ_B	307	298	300	299	295	308	298	301

Снижение предела прочности сварных образцов на 95...153 МПа связано, в основном, с появлением ОСН, вклад структурных изменений стали в снижение прочностных характеристик соединения для условий ЛС не превышает 10% [1]. Для оценки влияния технологических параметров лазерного излучения на статическую прочность СШ при

однопроходной ЛС листов из однородных материалов предлагается следующий алгоритм: (1) моделирование теплового состояния свариваемых образцов на основе решения нестационарной задачи теплопроводности методом КЭ с использованием современных САЕ-комплексов; (2) моделирование напряженного деформированного состояния (НДС) свариваемых образцов, вызванного температурным воздействием, на основе решения задачи теории термоупругости методом КЭ; (3) определение пластических температурных деформаций в зоне термического влияния СШ на основе обобщенного принципа Нейбера для температурных напряжений и уравнений Дж. Морроу, определяющих связь амплитуд упругой и пластической деформаций с количеством циклов до образования усталостной трещины; (4) определение ОСН в зоне термического влияния по результатам расчета пластических температурных деформаций.

Рассмотрим подробнее каждый шаг предлагаемого алгоритма. Решение нестационарной задачи теплопроводности осуществляется в трехмерной постановке методом КЭ. Движение источника тепла при ЛС учитывается последовательными вложениями теплоты по длине СШ. Для этого в модели область СШ разбивается на участки в виде последовательности отдельных объемов, геометрические размеры которых сопоставимы с размерами сварочной ванны (СВ). Время подвода теплоты на каждом участке зависит от длины СВ и скорости перемещения луча лазера. Температура объема СВ во время подвода теплоты принимается постоянной и равной температуре на границе СВ и основного металла, т.е. температуре плавления, далее следует остывание, обусловленное процессом теплопередачи в металл и окружающую среду. Для определения геометрических параметров СВ приемлемую точность обеспечивают зависимости [2]. Численное моделирование процесса ЛС проводилось для пластин из стали 3 толщиной 1,5 мм встык. Режим ЛС определялся на основании расчета параметров СВ [2]: мощность $P = 0,8$ кВт, скорость ЛС $v = 0,03$ м/с при нулевом положении фокальной плоскости лазера. Были получены следующие геометрические характеристики СВ: длина $L = 1,2$ мм, ширина провариваемой зоны $B = 1,3$ мм, максимальная глубина проплавления $H = 1,9$ мм. Таким образом, СШ длиной 30 мм состоял из 25 участков. Время прохождения лучом каждого участка составило $\tau = 0,04$ с. Для каждого из участков последовательно решалась нестационарная задача теплопроводности. При решении полученное на последнем шаге температурное поле являлось начальными условиями для последующего временного интервала. Теплоотвод с поверхностей свариваемых образцов моделировался граничными условиями 3 рода (коэффициент теплоотдачи – 300 Вт/м²К, температура окружающей среды – 19 °С), которые соответствовали условиям обдува инертным газом зоны сварки. Теплофизические свойства стали (теплоемкость, теплопроводность) задавались как функции от температуры. КЭ-модель состояла из 148249 узлов и 804472 четырехузловых объемных КЭ, средний размер ребра КЭ – 0,2 мм. 3D модели создавались в среде CAD – комплекса Solid Works, расчеты проводились в САЕ-комплексе SolidWorks Simulation.

Экспериментальная проверка проводилась на комплексе ЛРК-С, в составе: 6-ти осевой робот Fanuc M710iC-50, сварочная головка IPG FLW D50, иттербиевый волоконный лазер ЛС-5 мощностью 5 кВт и показала высокую эффективность предлагаемых методов расчета изменения температурного поля образцов в процессе ЛС. Измерение температуры образцов в процессе СВ проводилось с помощью термпар типа хромель-алюмель. Для регистрации температуры использовался цифровой многоканальный самописец, обеспечивающий непрерывную многоканальную регистрацию на жёсткий диск компьютера и одновременно визуальное наблюдение на экране монитора за протекающими процессами во время эксперимента. Сравнительный анализ показал высокую сходимость результатов моделирования и эксперимента в области максимальных температур (рис.1). Расчет НДС образца проводился на этапе охлаждения, т.к. именно в начале охлаждения в зоне термического влияния происходит развитие пластических деформаций сжатия, приводящих к появлению остаточных напряжений [3].

Постановка задачи соответствовала КЭ-реализации теории термоупругости. Полученные поля температур и напряжений использовались при выборе расчетной зоны и момента времени для определения ОСН. Расчетная зона – это зона термического влияния с максимальной температурой, где отсутствуют краевые эффекты, то есть материал не может свободно расширяться в каком-либо направлении.

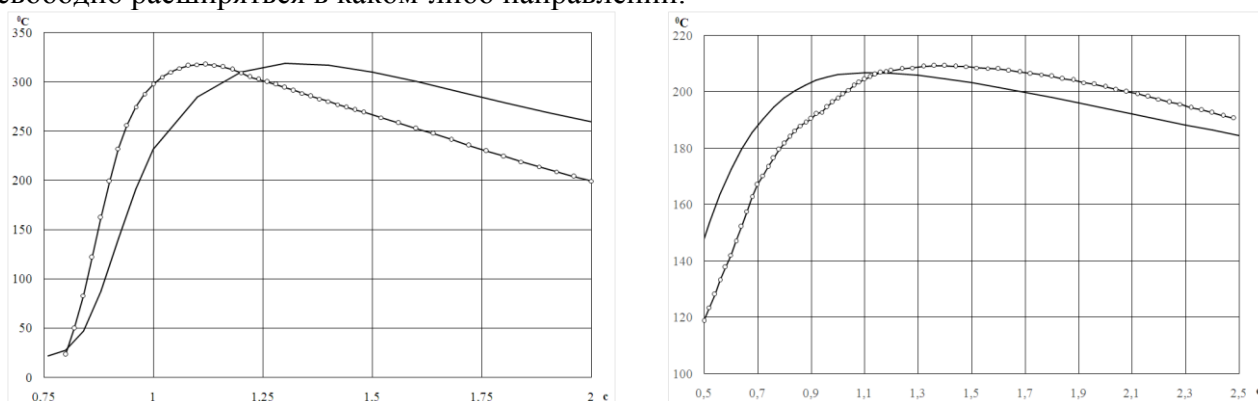


Рис.1- Расчетные и экспериментальные кривые изменения температуры в контрольных точках. ○ - расчет, — - эксперимент

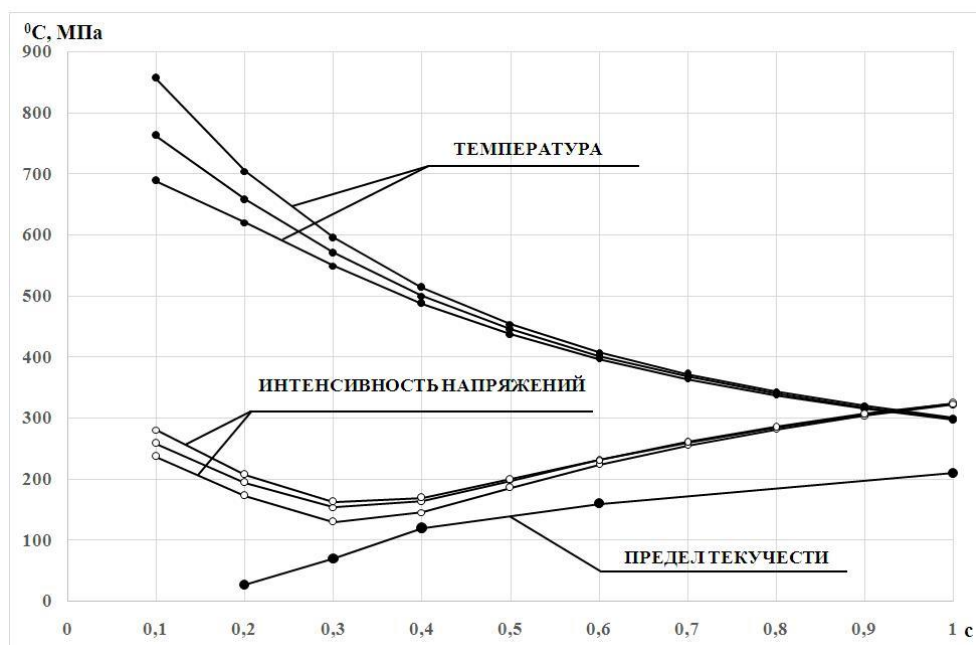


Рис. 2- Изменение температуры, интенсивности напряжений и прочностных характеристик свариваемых образцов в расчетной зоне на стадии охлаждения

Расчетный момент времени определялся по следующим критериям: прилегающий к расчетной зоне материал, включая область СШ, должен иметь температуру, при которой проявляются его упругие характеристики (для стали 3 – $\leq 650^{\circ}\text{C}$) [3]; разность между интенсивностью термоупругих напряжений и пределом текучести материала должна быть максимальной; выбранный момент времени должен соответствовать участку монотонного изменения НДС, что позволяет не учитывать процессы упрочнения материала на предыдущем временном отрезке (данному критерию соответствует состояние на 0,3 сек стадии охлаждения - рис.2).

Зная, что максимальный уровень ОСН характерен для зоны термического влияния СШ и то, что эта локальная зона ограничена «холодным» основным материалом, для вычисления пластических деформаций использовались зависимости концентраторов напряжений в условиях «жесткого» нагружения, полученных на основе обобщенного принципа Нейбера и уравнений Дж. Морроу [4,5]:

$$\sigma_{ie} = \sigma^m \left[\sigma + E \cdot \varepsilon_f \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^{c/b} \right]^{1-m}, \quad \sigma_f = 1,75\sigma_B$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_f \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^{c/b}, \quad \varepsilon_f = 0,5 \left[\ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right) \right]^{0,6}$$

где σ_B , ψ – предел прочности и относительное сужение стали при разрыве, E – модуль упругости, σ_{ie} – напряжение, полученное в результате решения задачи термоупругости, $b = -0.9 \dots -0.12$, $c = -0.5 \dots -0.6$ – для деформируемых материалов, $m = 0,1$ – для температурного нагружения [4].

Использование теории течения, реализованной в рамках КЭ- анализа, усложняется тем, что в процессе ЛС температурное поле образцов изменяется в широком диапазоне. Корректно описать кривые деформирования для области температур, близких к температуре плавления материалов, для реализации теории течения практически невозможно. В данной методике достаточно проведения термоупругого расчета и справочных данных по механическим характеристикам материала, полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2 - Пластические деформации и ОСН в расчетной зоне при ЛС встык образцов из стали 3

T, °C	σ_{ie} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ	ε_{pl} , %	$\sigma_{ост}$, МПа
600-550	130- 190	70 - 100	150 - 180	0.78- 0.71	0.0063-0.0076	125 - 150

Результаты расчетного определения ОСН, образующихся при ЛС, имеют высокую сходимость с результатами экспериментальной оценки снижения прочностных характеристик сварных образцов из стали 3 (табл. 1). Представленные результаты иллюстрируют возможности предлагаемой методики определения ОСН в условиях ЛС образцов из однородных материалов:

- алгоритм для моделирования теплового состояния деталей при ЛС позволяет с высокой точностью (рис. 1) рассчитать температурное поле в зонах термического влияния, что подтверждают результаты термометрирования в процессе сварки;

- алгоритм для моделирования процесса формирования ОСН при ЛС позволяет с высокой точностью (табл. 1, 2) рассчитать уровень остаточных пластических деформаций в зонах термического влияния и ОСН, что подтверждают результаты прочностных испытаний образцов.

Основное преимущество предлагаемой методики – возможность моделирования с использованием современных САЕ – комплексов на «полноразмерной» КЭ- модели сборочного узла.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-48-330772).

Список литературы

1. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учебное пособие для вузов под ред. А. Г. Григорьянца. –М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 663 с.
2. Жданов А.В., Иванченко А.Б., Усов С.В. Температурное состояние свариваемых стальных деталей в условиях ЛС // Успехи современной науки. – 2018. – №1. С. 24 – 28.
3. Биргер И. А. Остаточные напряжения М.: ГНТИМЛ, 1963. 232 с.
4. Прочность и долговечность элементов энергетического оборудования / Поспишил Б. и др. – Киев: Наук. думка, 1987. 216 с.
5. Shlegel A. N., Evtikheev N.N., Gusev D. S., Ivanchenko A.B. Modeling of butt and lap joint laser welding of aluminum alloys and constructional steel sheets// Non-ferrous Metals. 2016. No. 1.- pp 27 – 32. - I SSN 2072 – 0907

05.02.22

В.С. Наговицын д-р техн. наук, А.П. Буйнов д-р техн. наук, А.Р. Динисламов

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, vsnagovitsyn@yandex.ru, byinov@mail.ru, al.dinislamov@gmail.com

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВИНТОВЫХ РЕССОР ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье рассматривается методика расчета параметров цилиндрических винтовых рессор для разных ступеней рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Приведены результаты и обоснован выбор винтовых рессор для электровоза 2ЭС6.

Ключевые слова: *железнодорожный транспорт, подвижной состав, рессора, винт, применение, обоснование, выбор.*

Одним из способов снижения динамических нагрузок от железнодорожного подвижного состава (ПС) и путь – увеличение статического прогиба двух ступеней рессорного подвешивания. При этом должны быть выполнены требования ГОСТ 9246-2013 [1]. В настоящее время разрабатываются новые проекты ГОСТ по ресурсным испытаниям боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых локомотивов и вагонов, которые требуют проведения испытаний с учетом боковых, продольных и вертикальных нагрузок. В перспективе логичным будет проведение циклических испытаний цилиндрических винтовых рессор от суммарного действия вертикальной и боковой нагрузок, так как они являются передаточным звеном между боковой рамой и надрессорной балкой. Кроме того, нормы расчета и проектирования ПС (электровозов, тепловозов и вагонов) содержат расчет прочности цилиндрических винтовых рессор от действия вертикальной и горизонтальной нагрузок. Заключение о соответствии требованиям винтовых рессор ПС по показателю циклической долговечности формируется по результатам испытаний по межгосударственным стандартам (ГОСТ 32208-2013 и ГОСТ 9246-2013) от действия только вертикальной нагрузки. Учитывая наличие преждевременных изломов пружин в эксплуатации (рис. 1), вопрос учета горизонтальной силы при оценке запаса сопротивления усталости пружин на стадии разработки является актуальным.



Рис. 1– Излом витка пружины

Для оценки влияния горизонтальной силы на циклическую долговечность пружин тележек ПС на универсальной напольной испытательной машине (УНИМ) «TESTOMETRIK FS 100 AT» [2] при вертикальном и горизонтальном нагружении (рис. 2). Используя УНИМ можно определить следующие характеристики: пределы прочности при растяжении, сжатии, растяжении, модуль упругости при растяжении, сжатии, растяжении, предел текучести, удлинение, адгезия и прочность при отрыве, коэффициент трения, твердость и т. д. Решение поставленной задачи выполнялось на шести цилиндрических винтовых рессорах. Ввиду особенностей УНИМ, испытывались одновременно две цилиндрических винтовых рессоры.

В случае излома одной из винтовой рессоры, пара пружин заменялась на новую. Амплитуда нагрузки назначалась согласно ГОСТ 32208-2013 для цилиндрических винтовых рессор, исходя из условия, что значение амплитуды цикла напряжений при испытаниях от вертикальной нагрузки в диапазоне 25–45 % выше предела выносливости. База испытаний 6 млн. циклов.



Рис. 2– Универсальная напольная испытательная машина «TESTOMETRIK FS 100 AT»

Одна цилиндрическая винтовая рессора в каждой паре устанавливалась в УНИМ со смещением опорной части относительно вертикальной оси на 5 мм таким образом, чтобы в витках пружины создать дополнительное напряжение от горизонтальной силы. Перед циклическими испытаниями цилиндрической винтовой рессоры нагружались расчетной статической нагрузкой. После этого устанавливалась амплитуда с заданной частотой, и фиксировалось число циклов нагружений. Последняя пара цилиндрических винтовых рессор нагружалась без действия боковой нагрузки, строго вертикально. В результате, две цилиндрических винтовых рессор, испытанные при одновременном действии вертикальной и горизонтальной нагрузки разрушились по второму и третьему рабочему виткам после 500 и 700 тыс. циклов соответственно [3].

Две цилиндрических винтовых рессор, испытанные только при действии вертикальной нагрузки выдержали базовое число циклов без разрушения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о снижении на 90 % циклической долговечности цилиндрических винтовых рессор в случае наличия дополнительной горизонтальной силы с той же частотой, что и вертикальной нагрузке. Учет влияния горизонтальной силы на стадии разработки цилиндрической винтовой рессоры тележек ПС позволит уточнить циклическую долговечность и снизить количество преждевременных непараметрических отказов.

В ГОСТ 9246-2013 указано, что для обеспечения устойчивости винтовых рессор круглого сечения, работающих на сжатие, отношение высоты ненагруженной пружины H_0 к ее среднему диаметру D должно быть в зависимости от крепления опорных витков ($\Omega = H_0/D$): при шарнирном креплении – $\Omega \leq 1,75$; при жестком креплении – $\Omega \leq 3,5$. Такие соотношения предусматривают достаточный запас устойчивости цилиндрических винтовых рессор с учетом неточностей при изготовлении и довольно сложного характера эксплуатационной нагруженности пружин двух ступеней рессорного подвешивания ПС. Предельное значение отношения $\Omega_{\text{пред.}} = (H_0/D)_{\text{пред.}}$ определяется по формуле:

$$\Omega_{\text{пред.}} = \sqrt{\eta \frac{2 + \frac{1}{1+\mu}}{1 + \frac{1}{1+\mu}}}, \quad (1)$$

где η – коэффициент, зависящий от типа крепления винтовой цилиндрической рессоры; μ – коэффициент Пуассона.

В технической литературе почти все известные работы, в которых рассматриваются вопросы повышения вертикальной и горизонтальной устойчивости цилиндрических винтовых рессор, основаны на идее использования идеализированного бруса [3]. В работе В.М. Макушина [4] определено предельное отношение для разных случаев закрепления винтовой рессоры $\Omega_{\text{пред.}} = 1,307, 2,612, 3,750$ и $5,244$ для разных способах крепления пружины. Как видно, метод [4] дает «мягкие» требования по сравнению с межгосударственным стандартом.

При расчете винтовых рессор на первом этапе, определяют величину прогиба и напряжения существующей пружины [5]. Статический цилиндрических винтовых рессор определяется как:

$$f = \frac{8 \cdot D^3 \cdot n \cdot Q}{G \cdot d^4}, \quad (2)$$

где Q – нагрузка; G – модуль упругости (сталь 60С2ХА) при кручении; d – диаметр шлифованного прутка пружины.

Касательные напряжения от кручения цилиндрической винтовой рессоры

$$\tau = K \cdot \frac{8 \cdot Q \cdot D}{\pi \cdot d^3}, \quad K = \frac{4 \cdot C - 1}{4 \cdot C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (3)$$

Индекс цилиндрической винтовой рессоры

$$C = \frac{D}{d}. \quad (4)$$

Число рабочих витков пружины определяется как:

$$n_p = \frac{f_{B1} \cdot G \cdot d^4}{8 \cdot Q \cdot D^3}. \quad (5)$$

Поперечная жесткость пружины

$$Ж_B = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n \cdot D^3}. \quad (6)$$

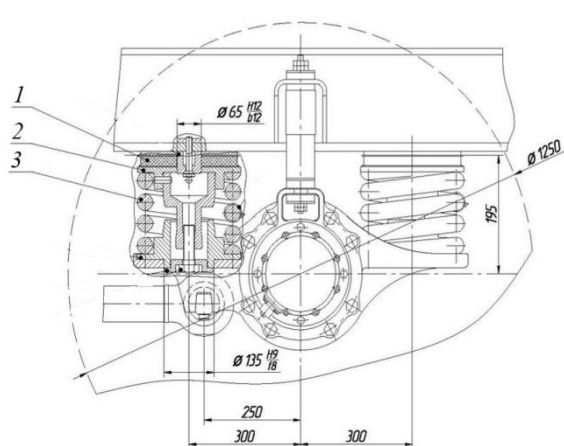


Рис. 3– Буксовое рессорное подвешивание

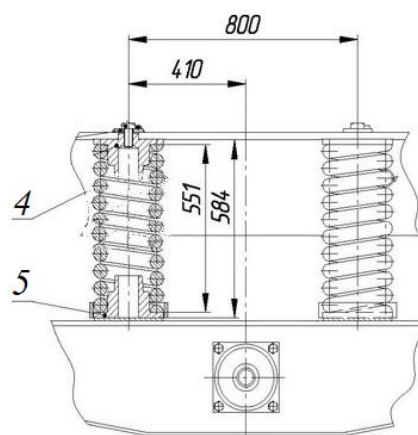


Рис. 4– Пружины типа «flexicoil»

Выполненные расчеты позволили выбрать буксовое рессорное подвешивание для электровоза 2ЭС6 (рис. 3). На верхние направляющие буксовых пружин 2 через резинометаллические амортизаторы 1 опирается рама тележки. При заданной осевой нагрузке 24 т на каждую буксу устанавливаются по две наружные пружины 3. Буксовые пружины изготовлены из стали 60С2ХА, $d = 42$ мм, $f = 58$ мм, $H_0 = 206$ мм, $Ж_B = 1,43$ кН/мм. Тележки связаны с кузовом через пружины типа «flexicoil» (см. рис. 4). Каждая тележка имеет кузовные пружины 4, установленные на направляющие нижние чаши 5, вставленные в фиксирующие кольца на боковинах рамы тележки. Расстояние между осями пружин вдоль боковин составляет 800 мм. Пружины также изготовлены из стали 60С2ХА, $d = 46$ мм, $f = 105$ мм, $H_0 = 550$ мм, $Ж_B = 123$ Н/мм.

Список литературы

1. Буйносов А.П., Динисламов А.Р. Выбор метода неразрушающего контроля термоупрочненных деталей механической части электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 1. С. 50-52.
2. Буйносов А.П. Расчет сил, действующих на надрессорное строение и колесую пару при движении локомотива в кривой // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 4. С. 42-44.
3. Наговицын В.С., Буйносов А.П. Структурная классификация технических средств диагностики тягового подвижного **состава** // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 326-329.
4. Буйносов А.П., Волков Д.В., Динисламов А.Р. Ультразвуковой неразрушающий метод контроля глубины поверхностной закалки деталей механической части подвижного состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2018. № 1. С. 104-108.
5. Буйносов А.П., Динисламов А.Р. Уменьшение погрешности измерения глубины поверхностного термоупрочнения деталей локомотивов неразрушающим ультразвуковым способом // Транспорт Урала. 2018. № 2(57). С. 69-72.
6. Буйносов А.П., Динисламов А.Р. Уменьшения погрешности измерения глубины поверхностного термоупрочнения деталей локомотивов неразрушающим ультразвуковым методом // Вестник транспорта Поволжья. 2018. № 1. С. 7-11.

05.02.00

¹А.Р. Фардеев канд. техн. наук, ²Ф.Д. Байрамов д-р техн. наук, ³А.А. Фардеев,
⁴Б.Ф. Байрамов канд. физ.-мат. наук

Набережночелнинский институт (филиал)
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
кафедра механики и конструирования,
Набережные Челны, ¹albert.fardeev@mail.ru, ²fbairamovd@gmail.com, ³progmast@mail.ru,
⁴bbairamov@gmail.com

ВОЗМОЖНОСТЬ ВКЛЮЧЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КОВКИ ИЛИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВОК

В статье проведен анализ существующих технологических процессов ковки и горячей штамповки заготовок на примере процесса штамповки заготовки шестерни заднего моста автомобиля на машиностроительном предприятии. Предложено автоматизировать некоторые этапы указанного технологического процесса при помощи манипулятора. Выбор захватного устройства произведен в зависимости от формы и температуры заготовки. Выбор продольных и поперечных размеров элементов модулей подвижности произведен в зависимости от величины необходимого хода по каждой степени подвижности манипулятора и величин внешних нагрузок.

Ключевые слова: технологический процесс, манипулятор, захватное устройство, продольный размер, поперечный размер.

Существующие технологические процессы ковки и горячей штамповки рассмотрим на примере процесса штамповки заготовки шестерни заднего моста автомобиля на машиностроительном предприятии. Он состоит из следующих этапов:

- 1) нагреть прутки металла до $T=(300...450)^{\circ}\text{C}$ в печи газовой механизированной;
- 2) отрезать заготовку по длине в автоматическом режиме пресс-ножницами автоматизированными и удалить их по склизу в тару;
- 3) переместить заготовки к индукционному нагревателю;
- 4) загрузить заготовку в индуктор вручную и нагреть до $T=(1170...1220)^{\circ}\text{C}$ (выгрузка заготовки на транспортёр автоматическая);
- 5) взять заготовку с приёмного лотка и уложить на осадочную площадку штампа штамповочного пресса вручную;
- 6) осадить заготовку в торец на $H=60\text{мм}$;
- 7) Переложить заготовку в предварительный ручей штампа вручную, поправить заготовку вручную;
- 8) штамповать в предварительном ручье;
- 9) переложить заготовку в окончательный ручей вручную, поправить заготовку вручную;
- 10) штамповать в окончательном ручье, выдержав размеры поковки;
- 11) удалить поковку из зоны штампа на транспортёр вручную;
- 12) смазывать штамп через 3 хода ползуна пресса пистолетом вручную;
- 13) взять поковку с приёмного лотка и уложить на штамп обрезающего пресса вручную;
- 14) обрезать облой и прошить отверстие, выдержав технические требования чертежа поковки;
- 15) удалить поковку из зоны штампа в тару вручную;
- 16) удалить выдру в тару вручную;
- 17) удалить облой в тару вручную;
- 18) сдуть окалину и охладить штамп сжатым воздухом.

Согласно перечисленным этапам рассматриваемого технологического процесса можно составить схему перемещения заготовки, которая показана на рис. 1.

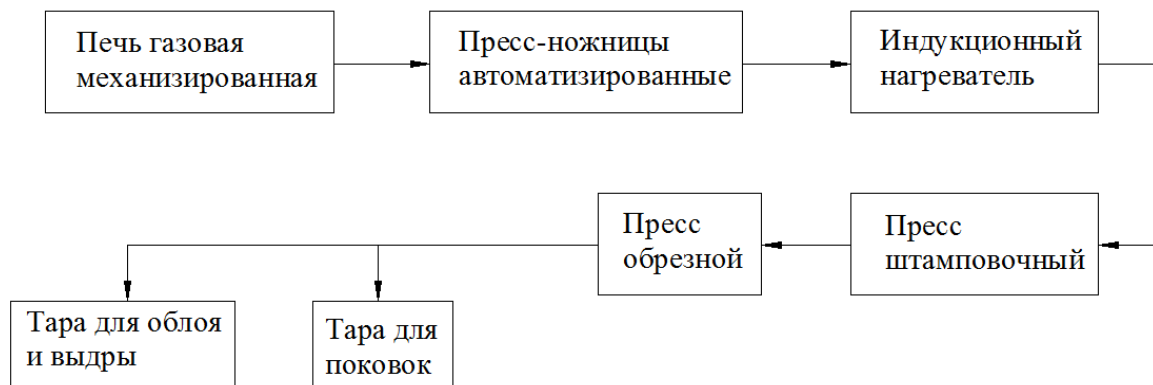


Рис. 1 – Схема перемещения заготовки в технологическом процессе горячей штамповки шестерни

Перемещение заготовки от одной машины к другой происходит либо по транспортёру, либо в таре при помощи погрузчика.

Но подача заготовки в рабочую зону прессов и удаление поковки из нее остаются неавтоматизированными. Эти этапы можно автоматизировать при помощи манипуляторов.

В процесс выбора манипулятора входят следующие этапы:

1) выбор количества, вида и взаимного расположения переносных степеней подвижности манипулятора;

2) выбор захватного устройства и ориентирующих степеней подвижности манипулятора;

3) выбор размеров модулей подвижности манипулятора;

4) выбор принципа управления манипулятором;

5) выбор механизмов приводов манипулятора.

Пункты 1, 4, 5 были рассмотрены ранее [1, 2, 3]

Рассмотрим второй этап. Выбор захватного устройства производится в зависимости от формы заготовки. На одном и том же оборудовании в различное время могут обрабатываться разные заготовки. Поэтому в каждом конкретном случае может использоваться свое захватное устройство. Следовательно, манипуляторы должны иметь возможность смены захватных устройств.

Схемы различных захватных устройств, в которых объект манипулирования удерживается силами трения и запирающими усилиями показаны на рис. 2. Такие захватные устройства называются схватывающими или схватами.

Кроме схватывающих по способу удерживания объекта манипулирования захватные устройства могут быть поддерживающими и удерживающими. В поддерживающих захватных устройствах объект манипулирования фиксируется за счет собственного веса, а в удерживающих – за счет различных физических явлений, например, за счет электромагнитных сил.

При проектировании манипулятора, перемещающего разогретые до высокой температуры заготовки, нельзя использовать электромагнит, т.к. от высокой температуры произойдет межвитковое замыкание его обмотки. Поддерживающие же захватные устройства могут использоваться лишь для захвата достаточно жестких тел, к которым не относится разогретая до высокой температуры заготовка. Поэтому в манипуляторе, используемом в рассматриваемом технологическом процессе, необходимо использовать какой либо из схватов.

Выберем наиболее простой из схватов, изображённый на рис. 2 под буквой *а*. Так как форма заготовки и поковок несложная, то этот схват сможет их удерживать.

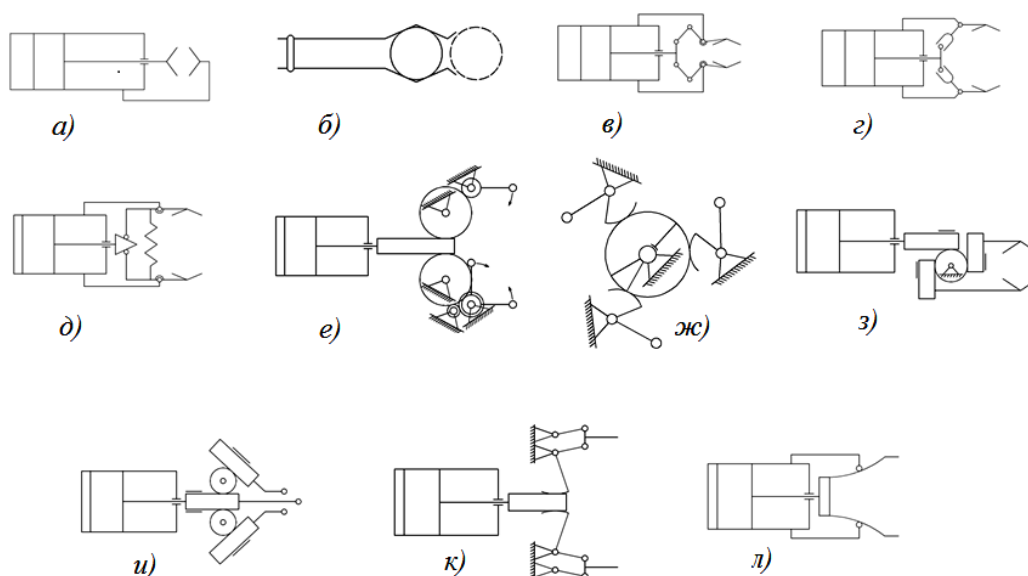


Рис. 2 – Схемы захватных устройств

Из трёх вращательных ориентирующих степеней подвижности манипулятора при его работе нет необходимости в повороте захватного устройства относительно горизонтальной оси, перпендикулярной продольной оси плунжера (см. рис. 2 а), т.к. ось последней поступательной степени подвижности манипулятора постоянно остаётся горизонтальной. Но из-за вибраций, которые возникают при работе пресса, эта горизонтальная ось будет сбиваться. Вернуть горизонтальное положение плунжера схвата можно будет при помощи поворота схвата относительно указанной оси. Следовательно, необходимо использовать все три возможные вращательные ориентирующие степени подвижности манипулятора. Одна поступательная степень подвижности понадобится для захвата объекта манипулирования.

Итак, выбираем захватное устройство с тремя вращательными и одним поступательным ориентирующими степенями подвижности.

Рассмотрим третий этап. Для выбора продольных размеров элементов модулей подвижности надо выяснить величину необходимого хода по каждой степени свободы манипулятора. Эти величины ходов зависят от конкретного технологического процесса.

Для определения поперечных размеров элементов модулей подвижности необходимо определить внешние нагрузки и реакции связей для каждого модуля подвижности. Это можно сделать, составив уравнения равновесия для подвижной части каждого модуля подвижности с учётом сил инерции, согласно принципу Даламбера. Зная силы, приложенные к элементам модулей подвижности, можно произвести расчёт этих элементов на прочность и определить их поперечные размеры.

Список литературы

1. Фардеев, А.А. Выбор количества, вида и взаимного расположения переносных степеней подвижности манипулятора при автоматизации технологического процессаковки заготовок / А.А. Фардеев // Материалы и технологии XXI века: сборник статей X международной научно-технической конференции, Пенза, март 2012 г. / АНОО «Приволжский Дом знаний» – Пенза. – 2012. – С. 123 - 125.
2. Фардеев, А.А. Автоматизированная система управления манипулятором, используемым в технологическом процессековки или горячей штамповки заготовок / А.А. Фардеев // Материалы и технологии XXI века: сборник статей XI международной научно-технической конференции, Пенза, март 2013 г. / АНОО «Приволжский Дом знаний» – Пенза. – 2013. С. 97 - 98.
3. Фардеев, А.А. Разработка механизмов приводов манипулятора, включённого в технологический процессковки или горячей штамповки заготовок с целью его автоматизации / А. А. Фардеев, Ф. Д. Байрамов // Проектирование и исследование технических систем : Межвузовский научный сборник / Камская государственная инженерно-экономическая академия. – 2011. Вып. 4. – С. 100-102.

05.02.07

**З.Р. Фасхиева, Р.М. Хусаинов канд. техн. наук, С.М. Петров канд. техн. наук,
Г.К. Давлетшина, Ф.Ф. Насыбуллин, Е.В. Стихнин**

Набережночелнинский институт Казанского федерального университета,
кафедра конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств,
Набережные Челны, zukhra.f86@gmail.com, rmh@inbox.ru, stelarvento@yandex.ru,
2009masik@mail.ru, fail-nf@mail.ru, stihnin.e@yandex.ru

ОБОСНОВАНИЕ РЕНОВАЦИИ ТЯЖЕЛОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Статья рассматривает вопросы целесообразности модернизации, важные задачи и мероприятия капитального ремонта крупногабаритных металлорежущих станков.

Ключевые слова: *геометрическая точность, модернизация, компенсация погрешностей.*

На производстве активно применяются крупногабаритные металлорежущие станки массой свыше 30 тонн. Огромной проблемой становится компенсация их физического и морального износа. Эта задача может быть решена путем приобретения нового оборудования или путем модернизации имеющегося. Такую задачу следует решать индивидуально, с учетом специфики конкретного производства.

В данной статье предлагается следующий подход к решению проблемы реновации тяжелого технологического оборудования:

1. Фиксирование проблем, возникающих на конкретном оборудовании и создающих проблемы в технологическом и экономическом аспектах.

2. Поиск причин этих проблем. Помимо метода «пяти почему?», традиционно применяемого для этого, в данном случае необходим более тщательный и обоснованный технический анализ, основанный на выявлении конкретных технических дефектов оборудования. Основным методом такого анализа является техническая диагностика. Виды и методы диагностики разнообразны и зависят от технической оснащенности и финансовых ресурсов предприятия.

3. Разработка методов устранения проблем, выявленных на этапе 1, с учетом причин их возникновения.

4. Техничко-экономический анализ возможности реализации этих методов. В настоящее время имеются широкие возможности как для приобретения оборудования, так и для его модернизации: расширяются предложения по комплектующим изделиям; появляются предприятия и организации, специализирующиеся на поставках или модернизации, в них разрабатываются типовые проекты модернизации на наиболее массовое и перспективное оборудование, повышается квалификация специалистов, растет опыт по проведению модернизации. Анализ возможности реализации мероприятий выполняется на основе технико-коммерческого предложения, предоставляемого организациями, специализирующимися на ремонте и поставке оборудования.

5. Реализация выбранного метода.

Рассмотрим применение этой методики на примере реновации горизонтально-расточного станка Skoda W200. На данный момент существует проблема неудовлетворительной точности геометрических форм и расположения обработанных поверхностей, низкой точности позиционирования, наличия сбоя системы ЧПУ.

Было проведено диагностирование этого станка в виде испытания на геометрическую точность, что дало следующие результаты [1,2]:

Таблица – Показатели точности

№ п/п	Показатели геометрической точности	Допустимые значения, мм	Фактические значения, мм
1	2	3	4
1	Плоскостность рабочей поверхности стола	0,02	0,025
2	Прямолинейность перемещения в вертикальной плоскости: а) стола по станине б) стола по салазкам	0,012 0,025	0,00 0,08
3	Прямолинейность перемещения в горизонтальной плоскости: а) стола по станине б) стола по салазкам	0,012 0,025	0,09 0,15
4	Прямолинейность перемещения шпиндельной бабки в вертикальной плоскости: а) параллельно оси шпинделя б) перпендикулярно оси шпинделя	0,02 0,02	0,08 0,11
5	Прямолинейность перемещения расточного шпинделя: а) в вертикальной плоскости б) в горизонтальной плоскости	0,012 0,025	0,04 0,06
6	Радиальное биение расточного шпинделя на длине 300 мм	0,016	0,08
7	Радиальное биение конического отверстия расточного шпинделя: а) у торца шпинделя б) на длине 300 мм	0,016 0,02	0,04 0,05
8	Осевое биение расточного шпинделя	0,02	0,12

Согласно протоколу испытаний на геометрическую точность фактические погрешности превышают допустимые значения в несколько раз, а отдельные показатели на порядок.

Такие дефекты могут быть устранены только при капитальном ремонте с восстановлением базовых поверхностей и полной заменой приводов и системы управления. В связи с этим принято решение о необходимости модернизации для восстановления геометрической точности и улучшения технических характеристик станка [3,4].

Исходя из характера дефектов станка, выявленных при испытаниях на геометрическую точность, при капитальном ремонте должны быть выполнены следующие мероприятия:

1. Ремонт направляющих станины и салазок.

В настоящее время можно проводить ремонт с применением современного оборудования - мобильных металлорежущих станков - и современных полимерных материалов.

2. Ремонт шпиндельного узла с изготовлением новых втулок и заменой подшипников, механизма зажима инструмента.

3. Оснащение станка новой системой ЧПУ, современными частотно-регулируемыми приводами.

После оснащения станка современной системой ЧПУ возможно обеспечение необходимой точности обработки с применением функций программного управления [5,6,7]. В настоящее время современные системы ЧПУ оснащены интеллектуальными функциями, позволяющими снизить влияние погрешностей механики станка на траекторию режущей кромки инструмента. Различают следующие виды программных компенсаций:

1. *Компенсация люфта.* Для компенсации люфта перемещение при каждом изменении направления движения корректируется на величину коррекции, введенную для этой оси в соответствующие машинные данные. Величина люфта может быть измерена при испытаниях на точность позиционирования.

2. *Интерполяционная компенсация.* Позволяет исправить погрешности позиционирования, погрешности непрямолинейности движения, неперпендикулярности между осями и угловые погрешности. Значения коррекции, равные величинам погрешностей, определяются путем испытаний и записываются в память системы ЧПУ в таблице компенсаций с привязкой к позиции вдоль оси.

3. *Компенсация трения.* Сильнее всего влияет на погрешности при обработке трение покоя в направляющих. Вызванные трением покоя ошибки контура могут быть хорошо скомпенсированы посредством задания приводом подачи дополнительного импульса движения с соответствующим знаком и амплитудой.

4. *Электронное весовое уравнивание.* У приводов вертикальной подачи без весового уравнивания после отпускания тормоза подвижный узел произвольно опускается и возникает погрешность по оси. После отпускания тормоза, имеющийся постоянный момент весового уравнивания удерживает позицию вертикальной оси.

Выполнение модернизации станка с данными мероприятиями должно обеспечить:

- экономичность по сравнению с покупкой нового станка;
- повышение производительности обработки;
- возможность обработки сложных поверхностей;
- повышение точности обработки.

Список литературы

1. ГОСТ 8–82. Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность. – М.: Изд-во стандартов, 1992 – 68 с.
2. ГОСТ Р ИСО 230-1-2010. Испытания станков. Часть 1. Методы измерения геометрических параметров. - М.: Стандартиформ, 2010 – 166 с.
3. Ремонт и модернизация станков // Ритм машиностроения. - 2017. - № 10. – С. 42-43.
4. Сафаров Д.Т., Кондрашов А.Г., Сафарова Л.Р., Глинина Г.Ф. Планирование энергетических затрат в производственных заданиях обработки деталей на станках с ЧПУ. СТИН. 2017. № 4. С. 27-35.
5. Геометрическая точность металлорежущих станков / Хисамутдинов Р.М., Хусаинов Р.М., Ведерников Ю.А., Петров С.М., Ступко В.Б. - Набережные Челны: ПЦ «Радуга», 2013. – 153 с.
6. Аникеева О.В. К построению системы оценок точности обработанных поверхностей. Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 6. С. 33-37.
7. Балабанов И.П., Симонова Л.А. Моделирование точности процессов формообразования на основе идентификации показателей качества партии заготовок // Труды III Международной научно–практической конференции “АВТОМОБИЛЬ И ТЕХНОСФЕРА”, Казань, 17–20 июня. – Казань: Издательство Казанского государственного технологического университета, 2003. 1160 с.

05.02.00

Д.А. Фомин

Сибирский федеральный университет,
Красноярск, fomindanila1992@gmail.com

МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИТУАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье рассматривается подход для создания аналитического ядра экспертной системы ситуационного анализа при эксплуатации нефтепромыслового оборудования. Приводится оптимизационная постановка задачи определения набора мер для обеспечения безопасности и безаварийности при эксплуатации оборудования. Предлагается подход решения задачи определения набора мер на основе эволюционного генетического алгоритма.

Ключевые слова: нефтегазопромысловое оборудование, деревья отказов, генетические алгоритмы, экспертная система, ситуационный анализ, управление ситуациями.

В связи с высокими требованиями к надежности технологических систем нефтяных и газовых промыслов использование только традиционных средств обеспечения их безопасности работоспособности, опирающихся на анализ событий является недостаточным. Одним из актуальных направлений решения этой проблемы является совершенствование методов управления надежностью и безопасностью и ситуационного анализа в технологических системах [1-3].

Перспективным видится разработка и использование экспертных систем для автоматизированного построения профилей и деревьев развития эксплуатационных ситуаций при использовании нефтегазопромыслового оборудования. Общая модель обеспечения надежной и безаварийной эксплуатации технологической системы описывает этот процесс как взаимодействие дестабилизирующих факторов, воздействующих на оборудования, и мер и мероприятий, препятствующих действию этих факторов. Итогом взаимодействия является тот или иной уровень обеспечения безопасности ситуации, безаварийности и работоспособности оборудования при решении конкретной производственной задачи.

1. Алгоритм формирования дерева развития эксплуатационной ситуации

Входными данными для алгоритма формирования дерева развития эксплуатационной ситуации: конструкция анализируемой системы (ее состояние на момент проведения анализа защищенности), описывающая состав системы и взаимосвязь ее элементов; множество рисков; множество параметров, характеризующих возможные угрозы безопасности. Результатом работы алгоритма является дерево развития аварийных и нештатных ситуаций.

В рамках комплексного подхода в разрабатываемой экспертной системе предполагается реализация аналитического модуля, решающего задачу поддержки принятия решений при выборе эффективного набора действий с учетом сбоев в технологической системе. В таком модуле реализуется решения задачи выбора действий в оптимизационной постановке с учетом рационального распределения ресурсов для достижения наибольшего эффекта по устранению сбоев. Такая задача, ввиду существенной размерности и с учетом многокритериальной постановки требует выбора адекватного метода многомерной оптимизации. В качестве такого метода предлагается использовать генетический алгоритм.

2. Постановка задачи оптимизации набора мероприятий промышленной безопасности

Разберем постановку задачи выбора оптимального набора мероприятий по повышению промышленной безопасности технологических систем на основе дерева развития аварийной ситуации.

Вводится формальный набор мероприятий, позволяющих повысить уровень промышленной безопасности элементов технологической системы. Рассматривается стандартный набор мер:

- для всех узлов – ремонтно-восстановительные работы, сервисное обслуживание или изменение режимов работы;
- для специфичных узлов: отключение, настройка режима работы.

Экспертом формируется относительно каждого узла технологической системы:

- остаточный риск (вероятный ущерб от нештатного развития ситуации, связанной с эксплуатацией анализируемого узла – *Residual Damage*) – *RD*;
- общая стоимость мер по повышению безопасности технологической системы (*Safety Control Cost*) – *SCC*.

Пусть определено множество, состоящее из n мероприятий, позволяющих повысить уровень эксплуатационной надежности (в рамках рассматриваемой ситуации – обеспечение требуемого варианта эксплуатации) элементов технологической системы (*Safety Controls*):

$$\{SC_i\}, i=\overline{1,n}. \quad (1)$$

Введем вектор, определяющий применение этих мероприятий:

$$\vec{T} = (T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n)^T, T_i = \begin{cases} 0, & \text{если мероприятие не осуществляется;} \\ 1, & \text{если мероприятие осуществляется.} \end{cases} \quad (2)$$

Введем вектор, определяющий стоимость осуществления мероприятий:

$$\vec{C} = (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n)^T. \quad (3)$$

Здесь C_i – стоимость осуществления мероприятия SC_i . Таким образом, необходимо решить задачу многокритериальной оптимизации:

$$\begin{cases} RD(\vec{T}) \rightarrow \min \\ SCC(\vec{T}) = \sum_{i=1}^n (T_i C_i) \rightarrow \min \end{cases}. \quad (4)$$

То есть необходимо решить задачу многокритериальной оптимизации, выбрав такую совокупность мероприятий, которая позволила бы минимизировать остаточный риск при минимизации затрат на реализацию таких мероприятий. При этом для каждого мероприятия определена матрица покрытия, определяющая множество вершин графа развития аварийных ситуаций, для которых она делает невозможным их достижение.

3. Генетический алгоритм формирования оптимального набора мероприятий промышленной безопасности

Генетические алгоритмы является мощным средством решения оптимизационных задач [4]. Генетические алгоритмы доказали свою состоятельность при решении многих трудных задач поиска и оптимизации и, особенно, в практических приложениях, где математические модели имеют сложную структуру и применение классических методов невозможно или чрезвычайно трудоемко. В основу данного метода оптимизации положена идея имитации эволюционных процессов. Полученные новые решения (потомки) с заданной вероятностью заменяют решения исходной популяции. Каждый индивид в генетическом алгоритме характеризуется некоторым числом (пригодностью), обозначающим меру его адаптации к окружающей среде.

4. Постановка и решение задачи робастной оптимизации

Данная постановка задачи (формула 4) была доработана и приведена к задаче робастной оптимизации. Это было сделано исходя из следующего предположения, находящего подтверждение в ходе работы специалистов по эксплуатации нефтегазопромыслового оборудования: ряд мероприятий из сформированного набора могут оказаться неэффективными.

Следовательно, решения должны обеспечивать минимальное изменение критериев оптимизации при переходе к «соседним» решениям.

Математическая постановка задачи приобретает следующий вид: необходимо найти такой бинарный вектор $\vec{T}$, определяющий состав мероприятий промышленной безопасности, что: формула (5).

$$\max_{\vec{T}_r} RD(\vec{T}_r) - RD(\vec{T}) \leq D. \quad (5)$$

Здесь $\vec{T}_r$ – бинарный вектор, отличающийся от $\vec{T}$ не более чем в r позициях; D – максимальное изменение оценки риска, которая определяется экспертом.

Это требует перехода к использованию в качестве алгоритмического ядра эволюционного алгоритма многокритериальной условной оптимизации [4].

Выводы

В рамках комплексного подхода в разрабатываемой экспертной системе предложена реализация аналитического модуля, решающего задачу поддержки принятия решений при выборе набора эффективного мероприятий с учетом возникновения аварийных ситуаций. В таком модуле реализуется решение задачи выбора мероприятий в оптимизационной постановке с учетом рационального распределения ресурсов для достижения наибольшего эффекта по снижению рисков. Такая задача, ввиду существенной размерности и с учетом многокритериальной постановки требует выбора адекватного метода многомерной оптимизации. В качестве такого метода предлагается использовать генетический алгоритм. Рассматриваемая задача и метод также предложены для решения с учетом перехода к робастной постановке задачи.

Список литературы

1. РД 50-690-89. Руководящий документ по стандартизации. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – Введ. 01.01.1991.
2. Рыбалко, В.В. Математические модели контроля надежности объектов энергетики : монография / В. В. Рыбалко. – Санкт-Петербург : ГОУ ВПО СПбГУТРП, 2010. – 150 с.
3. Слепченко, С.Д. Оценка надежности УЭЦН и их отдельных узлов по результатам промысловой эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Слепченко Сергей Дмитриевич. – Москва, 2011. – 146 с.
4. Сергиенко, Р.Б. Генетический алгоритм решения сложных задач оптимизации / Р.Б. Сергиенко, Е.С. Семенкин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. - №2 (23). – 2009. – С. 17-21.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ (05.11.00)**

05.11.13

Н.Н. Беспалов канд. техн. наук, В.Г. Мясин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарева,
кафедра электроники и наноэлектроники,
Саранск, ka-mgu@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ В КОРПУСЕ ТО-220
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИАТОРА**

В статье рассматриваются тепловые процессы для полупроводниковых приборов, выполненных в корпусе ТО-220. Исследованы случаи постоянной, нарастающей и переменной мощности, выделяемой в полупроводниковом кристалле прибора. Полученные результаты могут быть использованы при тепловых расчётах электрических преобразователей.

Ключевые слова: *тепловой расчёт, тепловая модель, IGBT, тепловое сопротивление, рассеиваемая мощность.*

При разработке устройств для испытания полупроводниковых приборов (ПП) с целью определения их электрических и тепловых параметров и характеристик необходимо учитывать многие факторы. В статье приведены результаты исследования влияния электрического режима нагрева ПП при испытании на тепловые процессы в их кристаллах. Современные ПП, в том числе транзисторы, диоды, микросхемы часто выполняются в корпусе ТО-220. Корпус стандартизирован комитетом инженеров, специализирующихся в области электронных устройств (Joint Electron Device Engineering Council) и предназначен для ПП малой и средней мощности с тепловыделением порядка 50 Вт.

Корпус состоит из медного основания, в котором предусмотрено крепёжное отверстие, также содержит выводы, число которых может меняться от двух до семи, и герметичный пластиковый корпус. К верхней стороне основания припаивается кристалл ПП. Тепловое сопротивление кристалл-окружающая среда без использования радиатора обычно составляет 40 – 50 °С/Вт, из-за чего предельные температуры кристалла достигаются при значении рассеиваемой мощности 2–2,5 Вт.

В статье приводятся исследования тепловых процессов ПП в корпусе ТО-220 при использовании радиатора. Исследование выполнено с использованием метода электротепловой аналогии. Данный метод основывается на аналогии дифференциальных уравнений электрического и температурного полей. В соответствии с методом электротепловой аналогии теплоёмкость элемента конструкции заменяется электрической ёмкостью, тепловое сопротивление заменяется электрическим сопротивлением. Аналогией мощности, выделяющейся в ПП, в методе электротепловой аналогии принят электрический ток. Потенциалы узлов схемы соответствуют температурам соответствующих элементов конструкции. Каждому элементу конструкции ПП в модели соответствует RC-цепь.

Электротепловая модель ПП в корпусе ТО-220 представлена на рисунке 1.

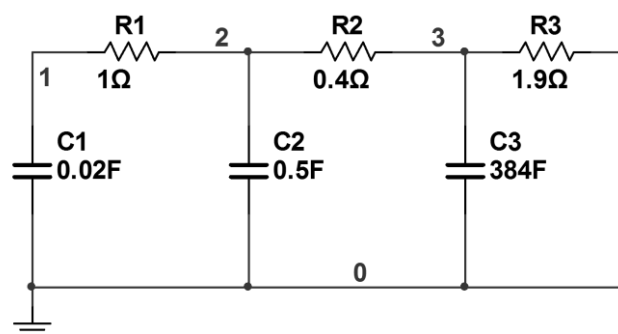


Рис. 1– Электротепловая модель ПП в корпусе ТО-220

Сопротивление $R1$ соответствует тепловому сопротивлению кристалл-основание корпуса, $R2$ – тепловому сопротивлению основание корпуса-радиатор, $R3$ – тепловому сопротивлению радиатор-окружающая среда. Ёмкость $C1$ равна теплоёмкости кристалла ПП, $C2$ – теплоёмкости основания, $C3$ – теплоёмкости радиатора.

Тепловое сопротивление кристалл-основание корпуса выбрано равным $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. Тепловое сопротивление основание корпуса-радиатор при наличии термоинтерфейса составляет $0,3\text{--}0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ и выбрано равным $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, тепловое сопротивление радиатор-окружающая среда выбрано $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, согласно [1, 2]. Радиатор серийного образца выполнен из алюминия, масса радиатора составляет $0,4\text{ кг}$.

Использованы усреднённые размеры полупроводникового кристалла $4\times3\times0,8\text{ мм}$. В таблице 1 даны значения массы элементов прибора в корпусе ТО-220, а также расчётные значения теплоёмкостей, используемых в электротепловой модели.

Таблица 1 – Параметры элементов электротепловой модели

Часть системы отвода тепла	Материал	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг $\times$ °C)	Масса, грамм	Теплоёмкость, Дж/°C
Радиатор	Алюминий	960	400	384
Основание	Медь	390	1,282	0,5
Кристалл	Кремний	780	0,02564	0,02

Исследовались изменения температуры кристалла T_j и температуры основания корпуса T_c , в модели им соответствуют напряжения $V(1)$ и $V(2)$. Электротепловая модель позволяет наблюдать за значением величины мощности теплового потока, проходящего через тепловое сопротивление кристалл-корпус P_{th} , которому соответствует ток $I(R1)$.

Моделирование произведено в программе *NI Multisim 11*. Использован инструмент transient analysis. Исследовались тепловые процессы для трёх вариантов рассеиваемой в кристалле мощности P_j : постоянная мощность, нарастающая мощность, мощность потерь в виде отсечённых синусоидальных импульсов частотой 100 Гц .

Случай переменной рассеиваемой мощности в виде отсечённых синусоидальных импульсов с частотой 100 Гц соответствует выпрямленным импульсам сети переменного тока. Амплитуда мощности потерь P_j выбрана так, чтобы средняя мощность составляла 50 Вт .

Температура основания корпуса в данном случае не зависит от колебаний рассеиваемой мощности (рисунок 2). Наблюдается запаздывание фазы мощности, проходящей через тепловое сопротивление кристалл-основание корпуса, от рассеиваемой мощности. Форма мощности потерь, проходящей через тепловое сопротивление кристалл-основание корпуса отличается от формы рассеиваемой мощности. Температура кристалла колеблется с частотой колебаний мощности потерь.

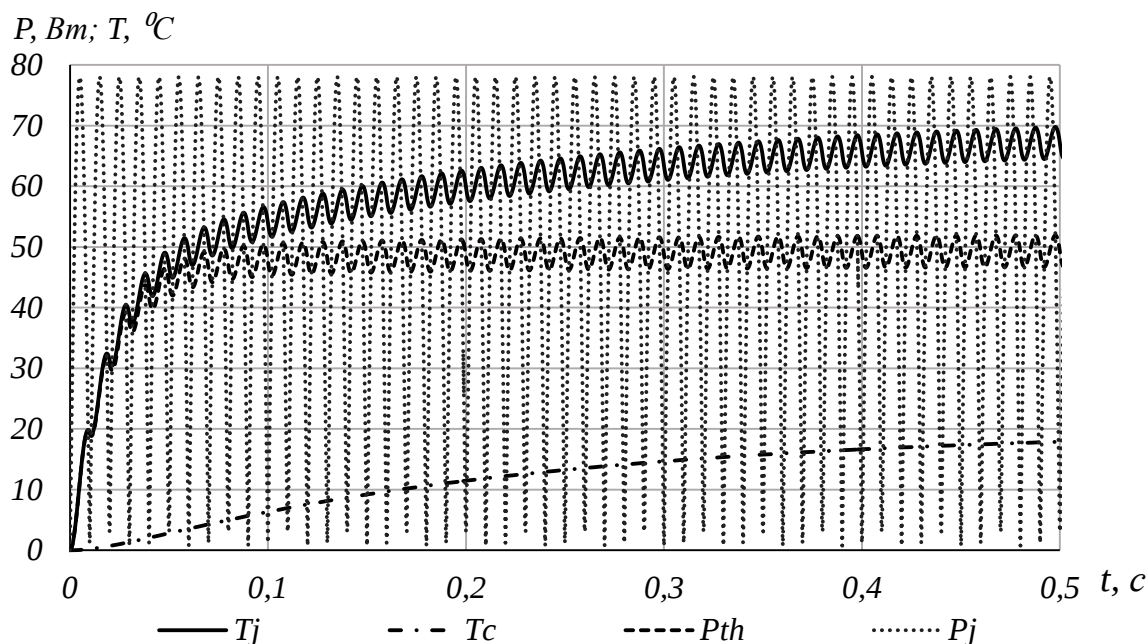


Рис. 2 – Результаты моделирования для случая переменной мощности

Случай нарастающей мощности P_j эмулирует положительный температурный коэффициент падения напряжения при протекании через прибор тока постоянной амплитуды.

ТКН для модели случая нарастающей мощности составляет 25% при изменении температуры кристалла на 125 °С. Подобным коэффициентом обладает, например, IGBT IRG4BC30FPbF в корпусе TO-220 [3].

Результаты моделирования, приведённые на рисунке 3, показывают значительное увеличение рассеиваемой в кристалле мощности на начальном этапе, что необходимо учитывать при эксплуатации полупроводникового прибора в близких к предельным режимах.

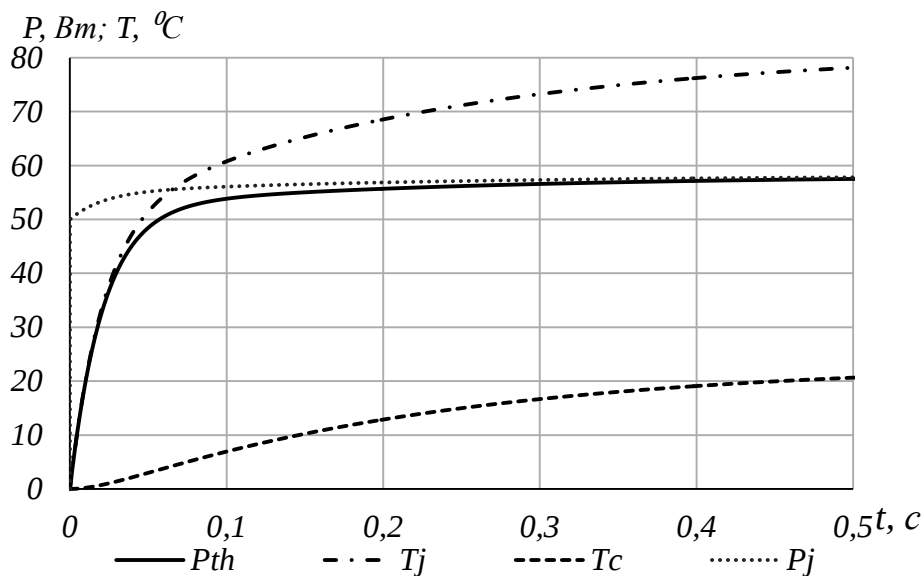


Рис. 3 – Результаты моделирования для случая нарастающей мощности

Случай постоянной рассеиваемой мощности (рисунок 4) часто допускается при расчётах систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры. Среди результатов моделирования данного режима следует отметить существенное отклонение мощности, проходящей через тепловое сопротивление кристалл-основание корпуса P_{th} , от рассеиваемой в полупроводниковом кристалле мощности P_j на начальном этапе.

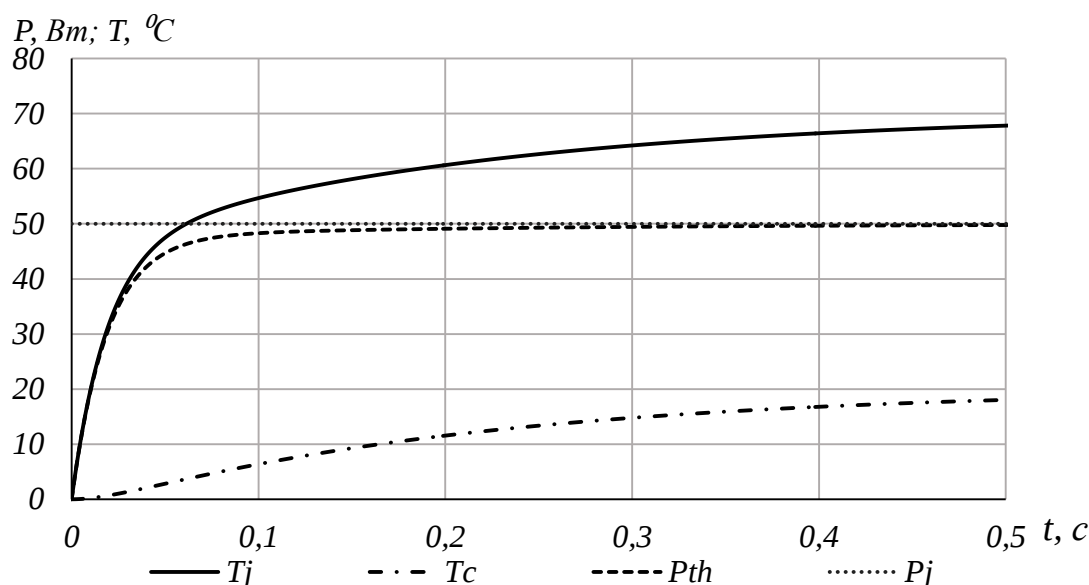


Рис. 4 – Результаты моделирования для случая постоянной мощности

Закключение. При действии переменной мощности в виде отсечённых синусоидальных импульсов элементы исследуемого корпуса ТО-220 проявляют свойства интегрирующей цепи для тепловых процессов, при этом температура основания корпуса не зависит от колебаний мощности, в то время как температура кристалла в значительной степени меняется при колебаниях рассеиваемой в полупроводниковом кристалле мощности.

В случае нарастающей мощности в начале теплового процесса происходит наиболее интенсивное изменение величины мощности потерь; при этом тепловой процесс, несмотря на наличие положительной обратной связи, в данной модели приходит к установившемуся режиму.

Труднореализуемый на практике режим постоянной мощности потерь приводит к установившемуся тепловому режиму после заряда теплоёмкостей элементов ПП. Отклонение мощности через тепловое сопротивление кристалл-корпус от величины мощности потерь на начальном этапе объясняется процессом заряда теплоёмкости кристалла.

Данные результаты исследования учитывались при разработке устройства для определения параметров и характеристик полупроводниковых приборов.

Список литературы

1. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М.: Додэка, 2005. 384 с.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
3. Официальный сайт компании Infineon Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.infineon.com> (дата обращения 16.09.2018).

05.11.00

О.Ш. Даутов д-р техн. наук, М.С. Аль-Абади

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева-КАИ,
Казань

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ РАБОТЫ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СФЕРЕ ПОД СЛОЕМ ПЛАЗМЫ

Исследовано влияние на работу щелевой антенны на металлической сфере под слоем плазмы длины волны, толщины плазменного слоя и плотности электронной плазмы. На основе метода интегро-функционального уравнения реализована возможность скалярного представления поля кольцевой щелевой синфазной антенны на металлической сфере. Численно с помощью программы в среде MATHCAD проанализировано влияние этих факторов на работу антенны. Обнаружено, что с помощью подбора подходящей плотности электронной плазмы, толщины ее слоя, электрических размеров сферы и кольцевой щели удастся получить удовлетворительную диаграмму направленности.

Ключевые слова: диаграмма направленности; сферическая щелевая антенна; плотность плазмы; толщина слоя; длина волны; интегро-функциональное уравнение.

1- Введение

Достижение оптимальной работы любой антенны является проблемой для специалистов. Кроме влияния геометрии и электрических размеров для некоторых типов антенн, особенно бортовых, существенно влияющих на их работу, являются параметры внешнего пространства, окружающего антенну, в частности, наличие плазменного слоя. Проблема взаимодействия электромагнитных волн с плазмой является интересной проблемой физики плазмы [1,2]. В зависимости от электронной плотности наблюдается значительное ослабление микроволнового излучения, когда электронная плотность плазмы имеет порядок 10^{13} см^{-3} , а толщина равна или превышает длину падающей волны [3]. Толщина слоя плазмы может вызвать существенное изменение спектра поглощения [4].

Существует много исследований по изучению диаграмм направленности для щелевой антенны с поверхностью определенного геометрического типа, такой как щелевая антенна на цилиндрической поверхности и сфере. Что касается щелевой антенны на цилиндрической поверхности, покрытой плазменной оболочкой, то для нее существует много теоретических и экспериментальных исследований [5,6]. Исследования направленных свойств осевого щелевого излучателя на цилиндре, покрытого плазменной оболочкой [7], показали, что происходит значительное ухудшение обратных потерь при утолщении толщины плазменной оболочки. Что касается щелевой антенны на сфере в свободном пространстве, проведено много исследований по численному расчету характеристик излучения [8,9,10]. В нашем исследовании рассматривается диаграмма направленности сферической щелевой антенны, покрытой слоем плазмы, геометрия которой представлена на рис. 1.

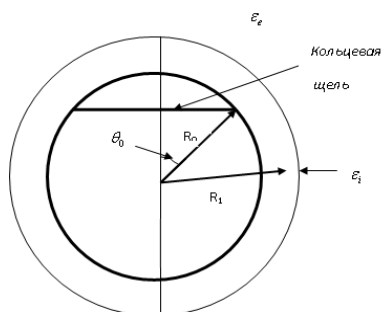


Рис.1. Кольцевая щелевая антенна на сферической поверхности, окруженная плазменным слоем

В соответствии с этим рассматривается кусочно-однородная система, ограниченная сферической идеально проводящей поверхностью с азимутальной синфазной щелью под сферическим слоем плазмы, окруженная однородным внешним пространством. Для построения модели использован метод интегрально-функциональных уравнений, не требующий непосредственного использования граничных условий и позволяющего использовать уравнение относительно электрического или магнитного поля [11], что снижает размерность задачи.

2- Параметры кольцевой щелевой антенны на сфере

Общее поле внутри плазменного слоя покрытия представлено в виде двух составляющих:

$$H_e = H_{oe} + H_{pe}, \quad (r \leq R_1) \quad (1)$$

$$\text{где: } H_{oe} = \sum_{n=1}^{\infty} D_n h_n(k_o \vec{r}), \quad H_{pe} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n j_n(k_o \vec{r}),$$

$$\text{Поле во внешнем пространстве } (r \geq R_1): H_e = \sum_{n=1}^{\infty} B_n h_n(k_e \vec{r}). \quad (2)$$

$$\text{где: } h_n(k_o \vec{r}) = \xi_n^{(2)}(k_o r) P_n^1(\cos\theta), \quad j_n(k_o \vec{r}) = \psi_n(k_o r) P_n^1(\cos\theta).$$

Функции, $\xi_n^{(2)}(z), \psi_n(z)$ - радиальные сферические функции, связанные соответственно с цилиндрическими функциями Ганкеля и Бесселя соотношениями:

$$\xi_n^{(2)}(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(z), \quad \psi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi}{2z}} J_n(z), \quad P_n^1(\cos\theta) - \text{присоединенные функции Лежандра,}$$

$$\text{определяемые соотношениями: } P_n^1(x) = \frac{\sqrt{1-x^2}}{2^n n!} \frac{d^{n+1}(x^2-1)}{dx^{n+1}} (|x| \leq 1) \quad (3)$$

Используемое интегро-функциональное уравнение имеет вид:

$$L(l, H_e) = \pi \int_l \left\{ H_e \frac{\partial(\rho_s G_{il})}{\partial \nu} - \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_e} \frac{\partial(\rho_s H_e)}{\partial \nu} G_{il} \right\} dl = \begin{cases} H_{oi} & (\vec{r} \in V_e) \\ -H_{pi} & (\vec{r} \in V_i) \end{cases}, \quad (4)$$

где ядро уравнения G_{il} является коэффициентом разложения при первой гармонике в разложении функции Грина по азимутальным гармоникам $\cos(\varphi' - \varphi)$.

В известном представлении функции Грина

$$G_i = -\frac{iko}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \psi_n(k_o r') \xi_n^{(2)}(k_o r) \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \frac{(n-m)!}{(n+m)!} P_n^m(\cos\theta') P_n^m(\cos\theta) \cos[m(\varphi' - \varphi)]$$

$$(r' \leq r), (\varepsilon_m = \begin{cases} 1 & (m=0) \\ 2 & (m>0) \end{cases})$$

изменяя порядок суммирования и с учетом того, что $P_n^m(x) \equiv 0 \quad (m > n)$: получаем представление ядра уравнения (4) в явном виде:

$$G_{il} = -\frac{iko}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \psi_n(k_o r') \xi_n^{(2)}(k_o r) P_n^1(\cos\theta') P_n^1(\cos\theta) \quad (5)$$

Принимая во внимание ортогональность присоединенных полиномов Лежандра:

$$\int_0^\pi P_n^1(\cos\theta) P_{n'}^1(\cos\theta) \sin\theta d\theta = \begin{cases} 0 & (n' \neq n) \\ \frac{2n(n+1)}{2n+1} & (n' = n) \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{можно представить: } L(l, H_{oe}) = \frac{i}{4} \sum_{n=1}^{\infty} D_n \begin{cases} \alpha_n^h(R_1) h_n(k_i \vec{r}) & (r > R_1) \\ \beta_n^h(R_1) j_n(k_i \vec{r}) & (r < R_1) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{где: } \alpha_n^h(R_1) = k_o R_1 \{ \xi_n^{(2)}(k_o R_1) [k_o R_1 \psi_n(k_o R_1)]' - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_o} [k_o R_1 \xi_n^{(2)}(k_o R_1)]' \psi_n(k_o R_1) \}, \quad (8)$$

$$\beta_n^h(R_1) = k_o R_1 \{ \xi_n^{(2)}(k_o R_1) [k_o R_1 \xi_n^{(2)}(k_o R_1)]' - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_o} [k_o R_1 \xi_n^{(2)}(k_o R_1)]' \xi_n^{(2)}(k_o R_1) \}. \quad (9)$$

Получаем для поля рассеяния: $L(l, H_{pe}) = \frac{i}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \begin{Bmatrix} \alpha_n^j(R_1) h_n(k_o \vec{r}) \\ \beta_n^j(R_1) j_n(k_o \vec{r}) \end{Bmatrix}$ (10)

где: $\alpha_n^j(R_1) = k_o R_1 \{\psi_n(k_o R_1) [k_i R_1 \psi_n(k_o R_1)]' - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} [k_o R_1 \psi_n(k_o R_1)]' \psi_n(k_o R_1)\}$, (11)

$\beta_n^j(R_1) = k_o R_1 \{\psi_n(k_o R_1) [k_o R_1 \xi_n^{(2)}(k_o R_1)]' - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_0} [k_o R_1 \psi_n(k_o R_1)]' \xi_n^{(2)}(k_o R_1)\}$. (12)

Подставляя (7), (10) в приведенное выше уравнение (4), в соответствии с этими условиями получаем:

$$D_n \beta_n^h(R_1) + A_n \beta_n^j(R_1) = 0 \quad (13)$$

$$A_n = D_n \sigma_n(R_1), \quad (14)$$

$$B_n = D_n \gamma_n(R_1), \quad (15)$$

Полное поле внутри плазменного слоя можно записать в виде:

$$H_e = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \{h_n(k_o \vec{r}) + \sigma_n j_n(k_o \vec{r})\} (R_0 < r < R_1). \quad (16)$$

Тангенциальная составляющая электрического поля на поверхности сферы может быть выражена через азимутальную составляющую магнитного поля (17) с помощью одного из уравнений Максвелла:

$$E_{e\theta}|_{r=R_0} = -\frac{1}{i\omega\varepsilon_0 R_0} \sum_{n=1}^{\infty} D_n \{[k_o R_0 \xi_n^{(2)}(k_o R_0)]' + \sigma_n [k_o R_0 \psi_n(k_o R_0)]'\} P_n^1(\cos\theta). \quad (17)$$

Тангенциальная составляющая электрического поля на поверхности металлической сферы связана с напряжением в щели и граничными условиями: $E_{e\theta} = \frac{U}{R_0} \delta(\theta - \theta_0)$, (18)

где дельта-функция Дирака имеет представление:

$$\delta(\theta - \theta_0) = \sin\theta_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{2n(n+1)} P_n^1(\cos\theta_0) P_n^1(\cos\theta). \quad (19)$$

Сравнивая (17), (18) с (19), получаем значения коэффициентов разложения D_n :

$$D_n = -\frac{i\omega\varepsilon_0 U (2n+1) P_n^1(\cos\theta_0) \sin\theta_0}{2n(n+1) \{[k_o R_0 \xi_n^{(2)}(k_o R_0)]' + \sigma_n [k_o R_0 \psi_n(k_o R_0)]'\}} \quad (20)$$

где σ_n может рассматриваться как коэффициент отражения n-ой гармоники от внешней границы плазменного слоя, а, соответственно, γ_n как коэффициент передачи гармоники во внешнее пространство. В соответствии с (2) и (15) внешнее поле можно записать следующим образом: $H_e = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \gamma_n h_n(k_e \vec{r}) (R_1 < r < \infty)$. (21)

Используя асимптотику функции Ханкеля: $\lim_{n \rightarrow \infty} H_{n+\frac{1}{2}}^{(2)}(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi z}} e^{-iz} e^{i\pi(n+1)/2} (z \rightarrow \infty)$ получим

представление поля дальней зоны: $H_e = \frac{ie^{-ik_e r}}{r} \sum_{n=1}^{\infty} D_n \gamma_n i^n P_n^1(\cos\theta)$

Электрическое поле имеет компонент $E_{e\theta}$, связанный с H_e соотношением: $F(\theta) = W H_e$, $(W = \sqrt{\frac{\mu_e}{\varepsilon_e}})$.

Электрическое поле дальней зоны можно представить в виде: $E_{e\theta} = G_e(r)F(\theta)$,

где $G_e(r) = \frac{e^{-ik_e r}}{4\pi r}$ – функция Грина однородной среды с параметрами внешнего пространства ($k_e = \omega\sqrt{\mu_e \varepsilon_e}$), $F(\theta)$ – диаграмма направленности электрического поля:

$$F(\theta) = 4\pi W \sum_{n=1}^{\infty} D_n \gamma_n i^n P_n^1(\cos \theta) \quad (22)$$

В этой статье мы предполагаем, что частота составляет 1 ГГц, и при данной частоте рассматриваются три случая: А - влияние на диаграмму направленности радиуса сферы в длинах волн при плотности $n_e = 10^{12}$, Б – влияние на диаграмму направленности толщины в длинах волн слоя плазмы $T = R_1 - R_0$ при $n_e = 10^{12}$. Ц – влияние на уровень излучения плотности плазмы n_e .

3- Результаты расчетов

А - Зависимость поля излучения от радиуса сферы при $n_e = 10^{12}$ и $T = \lambda/15$.

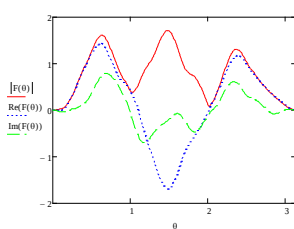


Рис.2. $R_0 = 3\lambda$

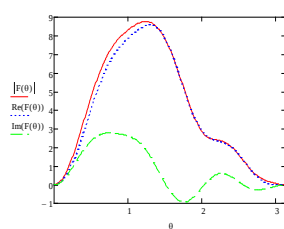


Рис.3. $R_0 = \lambda$

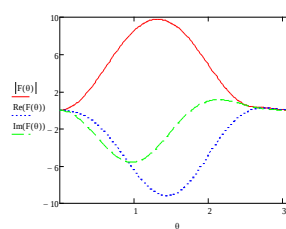


Рис.4. $R_0 = \lambda/2$

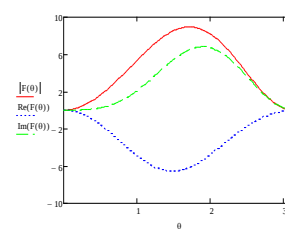


Рис.5. $R_0 = \lambda/4$

Б - Зависимость поля излучения от толщины плазменного слоя $T = R_1 - R_0$, окружающего сферическую щелевую антенну, при $R_0 = \lambda/2$

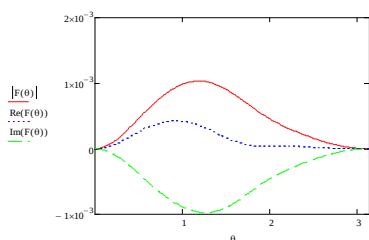


Рис.6. $T = \lambda$

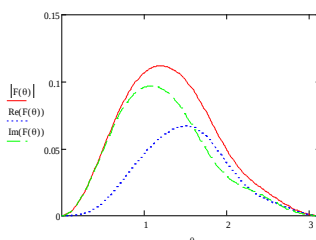


Рис.7. $T = \lambda/2$

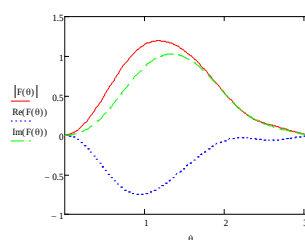


Рис.8. $T = \lambda/4$

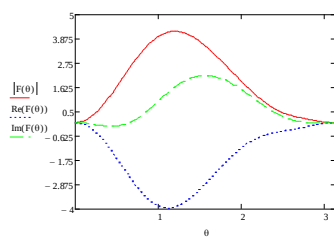


Рис.9. $T = \lambda/8$

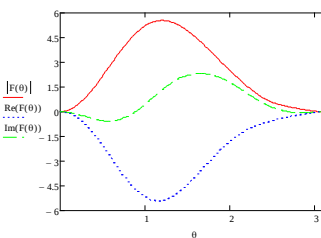


Рис.10. $T = \lambda/10$

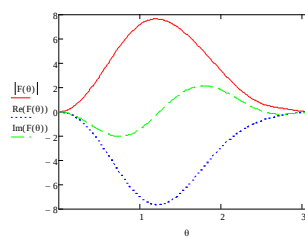


Рис.11. $T = \lambda/15$

Ц – Зависимость поля излучения от электронной плотности плазмы n_e для получения максимальной диаграммы направленности при $R_0 = \lambda/2$, $T = \lambda/15$.

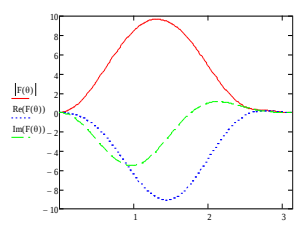


Рис.12. $n_e = 10^{10}$

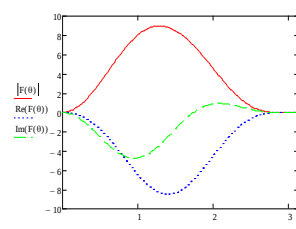


Рис.13. $n_e = 10^{11}$

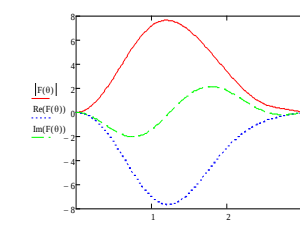


Рис.14. $n_e = 10^{12}$

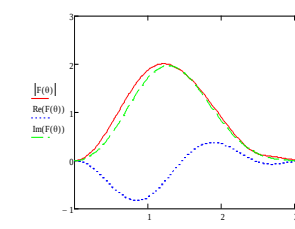
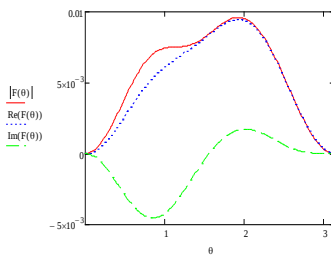
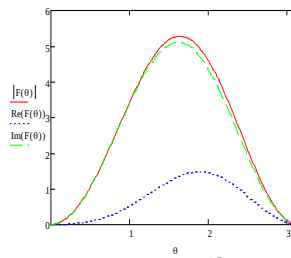
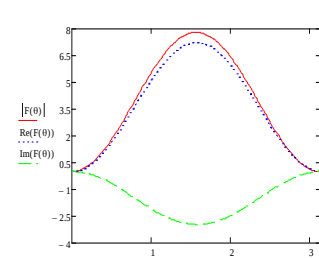


Рис.15. $n_e = 10^{13}$

Рис.16. $n_e=10^{14}$ Рис.17. $n_e=10^{13}$ при $f=300\text{MHz}$ Рис.18. $n_e=10^{14}$ при $f=300\text{MHz}$

4- Обсуждение

Как известно, определение подходящего размера (диаметра) антенны для получения максимальной диаграммы направленности и направленности зависит от длины волны. В нашем исследовании мы использовали длину волны как функцию для определения диаметра сферической щелевой антенны, как показано на рисунках 2-5. из сравнения, подходящей длины волны чтобы получить максимальное излучение и хорошую направленность, это было, когда радиус нашей антенны равен $\lambda / 2$, как показано на рисунке 4.

В зависимости от расчетов и обсуждений ранее, мы выбрали $\lambda / 2$ в качестве радиуса антенны и использовали его для изучения зависимости длины волны как функции, чтобы найти подходящую толщину плазменного слоя, который окружает сферическую щелевую антенну. Из рисунков 6-11 мы заметили, что максимальное излучение было при толщине плазмы $\lambda / 15$, как показано на Рисунке 11. В результате, эта толщина рассматривается как лучшая толщина плазмы дает хорошее излучение. на рисунке 6 уровень излучения стал близким к нулю при λ толщине плазмы, из-за того, что чем больше толщина плазмы, тем больше затухание в особых условиях.

В случае ц, при условии толщины плазменного слоя $\lambda / 15$, мы видим из рисунков 12-16, что влияние плотности плазменного слоя зависит от наличия между переданной угловой частотой и частотой плазмы. диаграмма направленности максимальна, как показано на рисунке 12, где $\omega \approx \omega_i$ при $n_e=10^{10}$. На рисунках 13-16, когда $\omega < \omega_i$, уровень диаграммы направленности уменьшается до минимального значения, особенно на рисунке 16. Эти низкие уровни в диаграмме направленности из-за увеличения плотности электронной плазмы, движение электрона соответственно уменьшается и, как следствие, увеличивается затухание в излучаемой волне.

Как показано на рисунках 15 и 16, диаграмма направленности очень низкая, но мы смогли значительно увеличить излучение как показано на рисунках 17 и 18, используя частоту 300 МГц вместо 1 ГГц, это небольшое изменение частоты дало этой антенне особую особенность.

5- Заключение

Из всех приведенных выше численных анализов видно что, можно получить максимальную диаграмму направленности и направленность, когда радиус сферической щелевой антенны покрытой слоем плазмы равен $\lambda/2$ и подходящая толщина для плазменного слоя равен $\lambda/15$.

Чтобы получить максимальную диаграмму направленности и максимальную направленность для этого типа антенны, используемая передаваемая угловая частот должна быть примерно равна плазменной частоте ($\omega \approx \omega_i$) и в противоположность этому (когда $\omega < \omega_i$), в случае большой разницы между этими частотами излучение будет очень низким соответственно.

Для этой антенны, можно значительно увеличить излучение используя частоту 300 МГц вместо 1 ГГц.

Список литературы

1. Ginzberg V.L., "The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma". New York: Pergammon, 1970.
2. Tang D.L., Sun A.P., Qiu X.M., and Paul K. Chu, "Interaction of Electromagnetic Waves With a Magnetized Nonuniform Plasma Slab" IEEE Transactions on plasma science. June 2003. Vol. 31, No. 3.
3. Mounir Laroussi and William T. Anderson "Attenuation of electromagnetic waves by a plasma layer at atmospheric pressure", International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1998. Vol. 19, No. 3.
4. Lin-Jin Guo, Li-Xin Guo, " Propagation of electromagnetic wave in a magnetized and non-uniform plasma", IEEE, 2016. P. 238-241.
5. Smith T.M., and. Golden K.E, "Radiation Patterns from a Slotted Cylinder Surrounded by a Plasma Sheath," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965. Vol.13, P. 775–780.
6. Calvin T. Swift, "Radiation Patterns of a Slotted-cylinder Antenna in the Presence of an Inhomogeneous Lossy Plasma," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1964. Vol.12, P. 728–738.
7. Li Wei, Qiu Jinghui, Deng Weibo, Suo Ying, "Research on an Axially Slotted Cylinder Antenna Coated with Plasma Sheath", IEEE,2008.
8. Slavko Rupčić, Vanja Mandrić, Davor Vinko, "Radiation Pattern of Waveguide Antenna Arrays on Spherical Surface - Experimental Results", International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems, 2010 Vol. 1, P.31-36.
9. Berdnik S.L., Katrich V.A., Nesterenko M.V. and. Penkin Yu.M, "spherical antenna excited by a slot in an impedance end-wall of a rectangular waveguide", DIPED-2013. P.111-114.
10. Ekajit Khoomwong and Chuwong Phongcharoenpanich "Analysis of an Arbitrarily Rotated Slot on a Conducting Spherical Cavity",IEEE.2007.P.1-4.
11. Даутов О.Ш. "Эквивалентность интегральных и интегро-функциональных уравнений электродинамических задач дифракции на неоднородных телах"// Изв. университеты. Радиофизика.1991.-Т.34.-№8.-С.936-946.

05.11.00

**И.В. Нелин канд. техн. наук, М.К. Седанкин канд. техн. наук,
С.Г. Веснин канд. техн. наук, В.А. Скуратов, М.В. Мартыанова**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
кафедра 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование»,
Москва, kaf-44-3@yandex.ru,
ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ; Москва
НИУ «МЭИ», кафедра ОРТ, Москва

РАЗРАБОТКА МЕДИЦИНСКОЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ТЕКСТИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Данная работа посвящена разработке печатной антенны для медицинской робототехники. Основная цель работы заключается в разработке антенны из материалов, применяемых в текстильной промышленности. Спроектирована печатная текстильная антенна на основе математического моделирования и экспериментальных исследований. Антенна протестирована на различных фантомах и биологических тканях. Результаты исследований показали, что антенна имеет приемлемые характеристики для использования в различных направлениях медицины.

Ключевые слова: микроволновая радиотермометрия, печатная антенна, радиояркая температура, медицинская робототехника.

Роботизация является важнейшим направлением развития современной медицины и армии. Необходимо преодолеть профессиональный консерватизм военных и медицинских работников, запустив инновации в здравоохранении. Для эффективного мониторинга витальных функций пациентов могут быть использованы радиометрические датчики на основе текстильных печатных антенн. Прием микроволнового излучения биологических тканей позволяет выявлять тепловые аномалии на глубине нескольких сантиметров. Интерес к подобным технологиям объясняется высокой чувствительностью метода микроволновой радиотермометрии (далее МР), который позволяет выявлять наличие травм, сосудистых патологий, воспалений, канцерогенезов и др. В клинической практике МР активно применялась в онкологии [1], в процессе терапии инсульта и черепно-мозговых травм [2], заболеваний малого таза [3], пиелонефрита [4] и др.

Создание миниатюрной антенны на основе материалов и комплектующих, применяющихся в текстильной промышленности, позволит осуществлять неинвазивное измерение внутренней температуры с приемлемой точностью, в течение длительного времени. Разработка текстильной антенны позволит перейти к созданию диагностических многоканальных систем, учитывая более низкую стоимость текстильных технологий. В МР применяются различные типы антенн, но наиболее перспективными антеннами являются печатные антенны [5]. Предполагается создание нескольких антенн, встроенных в носимые устройства, с возможностью приема микроволнового сигнала от многоканальной конформной антенной системы. Радиотермометр с микроволновым переключателем последовательно принимает сигнал с каждой антенны и визуализирует температуру внутренних органов в реальном времени. Тепловой мониторинг позволяет полностью контролировать здоровье пациентов и обнаруживать малейшие патологические изменения на основе записи и анализа температурных данных.

Радиояркая температура (РТ), измеряемая медицинским радиотермометром, зависит от термодинамической температуры $T(r)$ и весовой радиометрической функции $W(r)$ как:

$$T_{\text{rad}}(r) = \int_{-\infty}^{\infty} T(r)W(r)dV; \quad (1)$$

$$W(r) = \frac{\frac{\sigma(r)}{2}|E(r)|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma(r)}{2}|E(r)|^2 dV}; \quad (2)$$

где $E(r)$ – напряженность электрического поля антенны, создаваемого антенной, $\sigma(r)$ – электропроводность биологических тканей.

Для разработки антенны необходимо рассчитать её электрическое поле в многослойной среде с электрическими потерями. Расчёты были осуществлены в программе HIPERCON FDTD на основе интерфейса EMTL (библиотека электромагнитных шаблонов) [6]. Программа численно решает уравнения Максвелла методом конечных разностей во временной области. Для расчета электрического поля текстильной антенны использовалась многослойная модель биологического объекта (рис.1). Модель состояла из нескольких слоев, где каждый слой модели характеризовался определёнными биофизическими параметрами (табл.1). Размеры модели – 100 x 100 x 100 [мм].

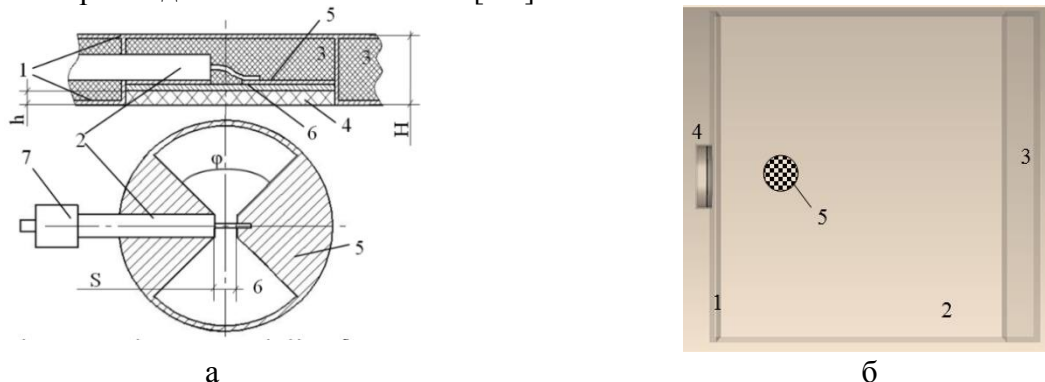


Рис.1. Текстильная антенна (а): 1 – экран, 2 – коаксиальный кабель, 3 – флис, 4 – материал PDMS, 5 – щелевой излучатель, 6 – полиимидная пленка, 7 – микроволновый разъем; модель (б): 1 – кожа, 2 – ткани молочных желёз, 3 – мышцы, 4 – антенна, 5 – опухоль.

Ось антенны расположена в центре исследуемого объема при $X_0 = 50$ [мм], $Y_0 = 50$ [мм]. Система возбуждения электромагнитных волн в антенне представляет собой щелевой вибратор в форме «бабочки». На границе исследуемого объема и проводящих поверхностей тангенциальные компоненты электрического поля равны нулю. После консультации с врачами, общий диаметр антенны был выбран равным $\varnothing 20$ [мм]. Топология щелевого излучателя с зазором размера S [мм] наносится на верхнюю сторону подложки толщиной h [мм] с диэлектрической постоянной ϵ . Нижняя открытая часть подложки контактирует с телом. Для обеспечения приемлемой помехозащищённости подложка установлена в металлический экран высотой H [мм].

Таблица 1. Физические параметры биологических тканей в частотном диапазоне 3,4-4,2 [ГГц] [7]

Электрофизические параметры	Кожа	Молочная железа	Мышцы	Злокачественная опухоль
Диэл. проницаемость, ϵ	35.5	10	51.1	50
Электропроводность, σ [См/м]	2.32	0.4	2.82	2
Толщина ткани, [мм]	2	88	10	-

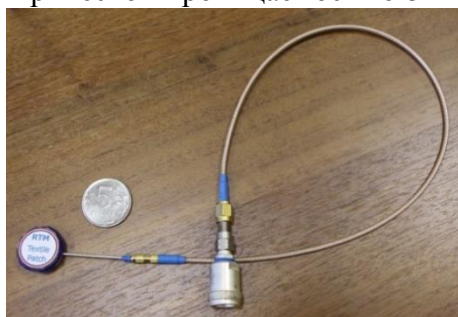
Запитка излучателя происходит следующим образом: внешний проводник коаксиального кабеля распаивается на одну сторону щели, внутренний проводник – на другую. При оптимизации геометрии антенны, в качестве критериев эффективности использовались КСВ (<2) и расчетные параметры антенн.

Таблица 2. Расчетные параметры текстильной антенны

Расчетные параметры	Текстильная антенна $\varnothing$ 20 [мм]
Глубина измерения [мм]	38.0
Объем области измерения [см ³]	57.0
X-ширина [мм]	52.0
Y-ширина [мм]	44.0
Радиояркая температура (опухоль $\varnothing$ 10 [мм], глубина 10 [мм])	1.08

В соответствии с методикой, описанной в [8], в которой изложены полные сведения о проектировании и особенностях конструкции антенны, были рассчитаны различные параметры и характеристики текстильной антенны (табл. 2). Очевидно, что текстильная антенна имеет приемлемые характеристики и не уступает волноводным антеннам, используемым в медицине.

В результате математического моделирования определены оптимальные параметры печатной текстильной щелевой антенны. Корпус текстильной антенны выполнен в виде цилиндра $\varnothing$ 20 [мм] с использованием материала Radioscreen (толщиной 0,09 [мм]) для экранирования. Внутри полость заполнена подложкой с материалом PDMS (толщиной 2 [мм] с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 20$) $\varnothing$ 19 [мм].



а



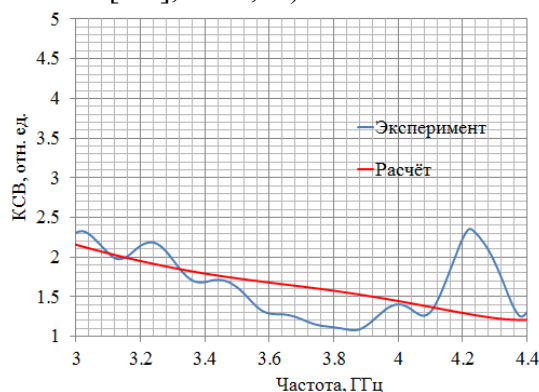
б

Рис.2. Прототип текстильной антенны с кабельной сборкой для подключения к измерительным устройствам (а); излучатель антенны с фидером (б)

Полиимидная пленка ($\epsilon = 3,5$) с печатной топологией щелевого излучателя приклеивается к верхней стороне подложки с помощью специального клея. Пространство между излучателем и экраном заполнено флисом (с толщиной ≈ 3 [мм], $\epsilon = 1,17$).



а



б

Рис.3. Измерение внутренней температуры верхней боковой части предплечья (а); результаты измерений KCB и расчётные данные (б).

Общая высота антенны $H = 5$ [мм]. Основная частота антенны составляет 3,8 [ГГц] ($KCB < 2$). Для проверки корректности моделирования проведены экспериментальные исследования с помощью анализатора цепей Agilent Technologies E5071C в частотном диапазоне 3-4,4 [ГГц]. На рис.3 показаны экспериментальные и расчетные характеристики антенны KCB в рабочей полосе и типичное измерение. Очевидно, что антенна имеет приемлемые характеристики ($KCB < 2$) на различных участках тела.

Заключение

В результате исследований разработана текстильная печатная антенна для приема микроволнового излучения биологических тканей в диапазоне 3,8 [ГГц]. С использованием результатов математического моделирования ($K_{CB} < 2$, глубина измерения – 38 [мм]) определена оптимальная конструкция и изготовлен радиометрический датчик на основе печатной щелевой антенны. Антенна была выполнена в виде цилиндра с габаритными размерами $\varnothing 20 \times 5$ [мм]. Результаты медико-биологической верификации созданной антенны подтверждают выполнение системой заданных функций. Происходит стабильная регистрация температуры с погрешностью $\pm 0,2$ °С. Миниатюрный радиометрический датчик позволяет осуществлять эффективное неинвазивное измерение внутренней температуры с приемлемой точностью в течение длительного времени. Созданная антенна может быть в состав медицинских робототехнических комплексов и других медицинских изделий.

Список литературы

1. Modern microwave thermometry for breast cancer/ Vesnin S. G.[et. al.]// J. Mol. Imag. Dynamic. 2017.7:136
2. Diagnostic opportunities of noninvasive brain thermomonitoring/ O.A. Shevelev [et al.]// Anesthesiology and Intensive Care. 2015. V. 60. № 1. P. 66-69.
3. Хашукоева А.З., Цомаева Е.А., Водяник Н.Д. Применение трансабдоминальной и вагинальной радиотермометрии в комплексной диагностике воспалительных заболеваний придатков матки//Лечение и профилактика. 2012. № 1.С. 26-30
4. Радиотермометрия в диагностике острого пиелонефрита/ Авдошин В.П.[и др.]//Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. 2002. № 2. С. 67-69.
5. Modeling of the dipole, helical and cavity-slot antennas applicators for multichannel medical radiothermographs/ Bobrikhin, A.F., Gudkov, A.G., Leushin, V.Yu., Los', V.F., Porokhov, I.O., Sidorov, I.A. (2014) CriMiCo 2014 - 2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, статья № 6959753, pp. 1047-1048.
6. FDTD subcell graphene model beyond the thin-film approximation /Valuev I. [et. al.]// Applied Physics A. 2016. V. 123, Issue 1. P.1-7
7. S. Gabriel, R. W. Lau, C. Gabriel, The dielectric properties of biological tissues. 2. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz, Phys. Med. Biol. .V.41. P. 2251–2269
8. Development of patch textile antenna for medical robots/ Sedankin M.K.[et al.] 2018 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). 27-28 Sept. 2018. Saratov, Russia.P.413-420

05.11.00

¹Ф.Ф. Рамазанов канд. техн. наук, ²И.Ф. Рамазанов

Казанский (Приволжский) Федеральный Университет,
Набережночелнинский институт,
отделение энергетики и информационных технологий,
¹кафедра физики, ²кафедра высокоэнергетических процессов и агрегатов,
Набережные Челны, kafiziki@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО АНЕМОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

В статье рассматривается применение лазерного доплеровского анемометра для измерения параметров потоков с высокой степенью турбулентности в энергетических установках. Установлено, что бесконтактный метод лазерной доплеровской анемометрии позволяет получить достоверную картину распределения поля скоростей в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, светорассеивающие частицы, измерительный объём, алгоритм обнаружения-оценки, поле скоростей.

Измерение скоростей потоков жидкости или газа, обладающих высокой степенью турбулентности, является актуальной научной проблемой из-за отсутствия строгих аналитических решений. Поэтому экспериментальные методы исследования турбулентных потоков имеют особо важное значение. Абсолютным методом измерения скорости потока является метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА), описанный в литературе [1]. Измеряя доплеровский сдвиг частоты (ДСЧ), вызванный рассеянием света на оптических неоднородностях – светорассеивающих частицах (СЧ), можно определить скорость движения потока, так как существует однозначная, линейная связь между ДСЧ и скоростью частицы. При дозвуковых скоростях потоков относительное изменение частоты излучения порядка 10^{-8} , поэтому применение эффекта Доплера для измерений скоростей потоков возможно только на рассеянии монохроматического лазерного излучения на оптических неоднородностях.

При исследовании турбулентных потоков жидкости и газа недостаточно знать среднюю скорость потока и пульсации скорости, также необходимо определить направление вектора скорости потока. Поэтому для измерения скорости СЧ используются двух или трехкомпонентные ЛДА. Трехкомпонентные ЛДА технически сложно реализуемы. Двухкомпонентные ЛДА являются наиболее оптимальными, хотя и имеют существенный недостаток – для определения ориентации вектора в каждой точке потока необходимо измерить скорость в двух плоскостях.

Линии излучения аргонового лазера, а именно зеленая и голубая, используются для определения двух компонент скорости потока. В то же время в измерительном объеме (ИО) формируются две системы интерференционных полос, образованных двумя световыми волнами различной частоты. В этом случае для определения знака двух проекций скорости используется ячейка Брэгга. Схемы такого типа используются для проведения одноточечных измерений в потоках с неизвестным направлением течения и в потоках с высокой степенью турбулентности.

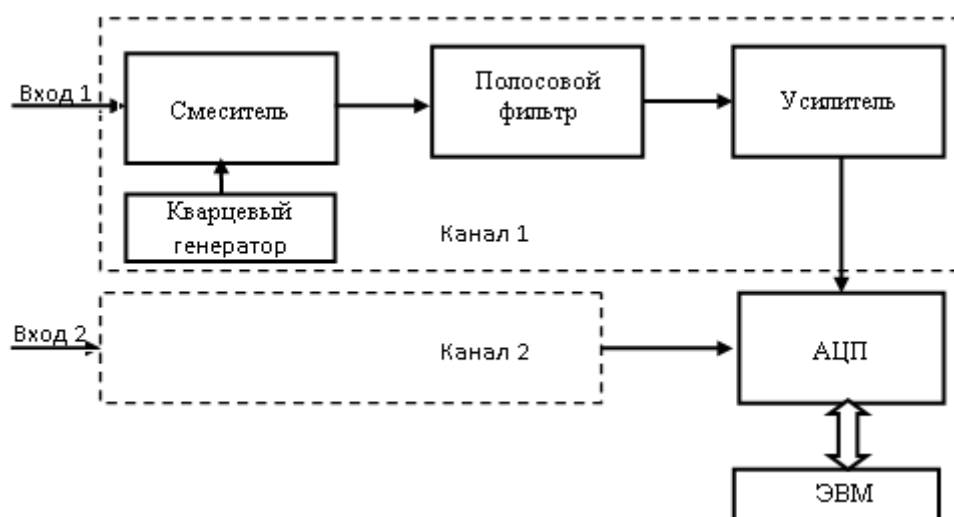


Рис.1- Функциональная схема системы обработки

Для решения задачи обнаружения и оценивания стохастического сигнала ЛДА можно использовать аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В системе обработки (рис.1.) производится ввод сигнала ЛДА в цифровой форме в ЭВМ и дальнейшая его обработка [2].

Была разработана система обработки сигнала ЛДА на базе АЦП ЛА-н10М6 с частотой дискретизации 100 МГц для цифровой обработки сигнала ЛДА в режиме реального времени [3]. Данная функциональная схема представлена на рис.1.

Система обработки сигнала должна различить две конкурирующие гипотезы:

$$\begin{aligned} H_0: & \quad \xi(t) = \zeta(t, v_d) + n(t), \\ H_1: & \quad \xi(t) = n(t), \end{aligned}$$

где $\xi(t)$ – сигнал на входе системы обработки, $\zeta(t, v_d)$ сигнал ЛДА, $n(t)$ – шум. Согласно H_0 на входе системы смесь полезного сигнала и шумов, согласно H_1 на входе системы полезный сигнал отсутствует. Само наличие сигнала уже подтверждает присутствие в нем полезной информации, т.к. она содержится не только в доплеровской частоте v_d , являющейся информативным параметром сигнала. Критерием обнаружения сигнала является превышение амплитуды сигнала заданного предельного порогового значения.

В реализованной системе сброс частоты сигнала ЛДА 80 ± 5 МГц осуществляется в область 10 ± 5 МГц с помощью смесителя. С помощью эллиптического фильтра 14-го порядка происходит фильтрация сигнала.

Стояла задача исследования поля скоростей аэродинамического потока в цилиндре двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Для этих целей был разработан специальный блок модельного цилиндра. Блок состоит из модели цилиндра, сделанной из прозрачного материала, а также головки цилиндра AVL-2, закрепленной на поворотном узле. Благодаря поворотному узлу возможно изменение ориентации головки цилиндра, что в дальнейшем способствует измерению как продольной, так и поперечной скоростей потока. Для продувки цилиндра использовалась специальная система газоснабжения: компрессор, расходный кран, манометр для измерения давления, генератор СЧ и трубопроводы. При помощи компрессора происходит подача воздуха во впускной канал головки, при этом можно моделировать газовый поток, изменяя расход воздуха в головке. В исследовательской установке реализуется режим, при котором в ИО находится одна СЧ. Благодаря генератору СЧ обеспечивается данный режим в разработанной установке и происходит получение монодисперсного аэрозоля с заданным диаметром частиц и оптимальной концентрацией. Для исследований был применен специально изготовленный порошок Al_2O_3 . Монодисперсные СЧ имели диаметр 0,5 мкм и высокую отражательную способность.

Благодаря разработанному стенду были осуществлены исследования газодинамических потоков в цилиндре ДВС на станции испытания двигателей Научно-технического центра ПАО «КАМАЗ». Измерения проводились внутри модельного цилиндра в определенной точке потока в режиме статической продувки. Управление ходом эксперимента и проведение статистической обработки производилась специальным программным обеспечением. Измерения проводились дважды в каждой точке потока при различных ориентациях ИО в нескольких сечениях цилиндра ДВС. Полученные результаты представлены в виде таблицы для трех компонент вектора средней скорости в полярных координатах. Распределение вертикальной составляющей скорости в цилиндре головки AVL – 2 при $Z=80$ мм. $\Delta p=100$ кПа представлено на рис.2.

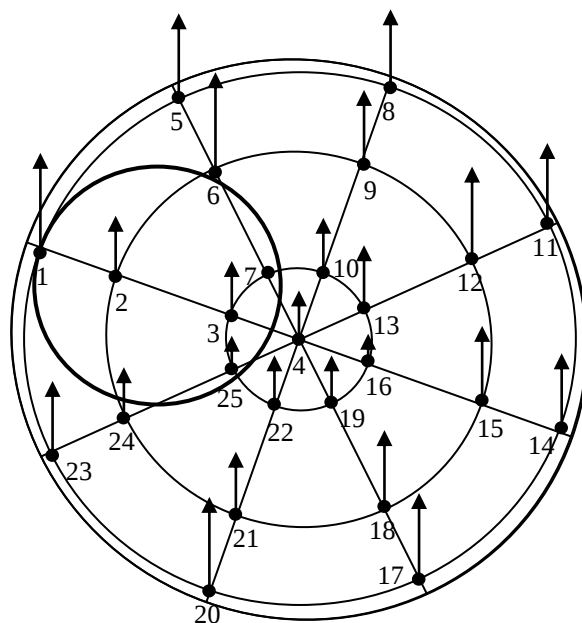


Рис.2- Распределение вертикальной составляющей скорости в цилиндре головки AVL – 2 при $Z=80$ мм. $\Delta p=100$ кПа.

Таблица - Составляющие скорости в цилиндре головки AVL – 2 при $Z=80$ мм. $\Delta p=100$ кПа.

№ точки	$v_r, \text{м/с}$	$v_\phi, \text{м/с}$	$v_z, \text{м/с}$	$v, \text{м/с}$
1	07.43	-17.94	16.86	25.72
2	15.61	-11.75	19.75	27.78
3	20.92	02.91	11.10	23.86
4	10.05	-16.70	21.25	28.83
5	09.05	-28.91	26.11	39.99
6	09.61	-16.82	21.41	28.87
7	-09.90	-07.63	18.41	22.22
8	-13.29	-17.15	19.22	28.99
9	-03.23	-14.84	22.19	26.89
10	-05.56	-17.64	19.38	26.79
11	-03.38	-39.90	27.55	48.60
12	-00.41	-16.54	29.78	34.08
13	05.75	02.35	22.29	23.14
14	-02.99	-03.11	27.96	28.29
15	11.64	-19.36	25.28	33.90

16	-11.42	-05.70	10.48	16.51
17	04.27	03.70	32.65	33.14
18	-06.60	-11.79	19.02	23.33
19	01.81	05.44	05.74	08.11
20	-00.23	-01.38	22.50	22.54
21	01.88	04.72	07.53	09.08
22	-02.49	10.81	13.25	17.28
23	00.08	00.53	07.28	07.30
24	13.37	-07.74	11.26	19.12
25	13.84	-08.81	12.11	19.12

Вывод: в ходе проведенных экспериментальных исследований газодинамических потоков в цилиндре ДВС выявлено, что система на основе ЛДА позволяет получить точную картину распределения потоков в цилиндре.

Список литературы

1. Клочков В.П., Козлов Л.Ф., Потыкевич И.В., Соскин М.С. Лазерная анемометрия, дистанционная спектроскопия и интерферометрия. Киев, «Наукова думка», 1985г.
2. Кришталь В.И., Страшинский Ч.С., Милованов В.Н., Юнусов Н.Б., Рамазанов Ф.Ф., Загиров Р.Г., Гайсин О.Б., Аливанов В.В. Лазерный доплеровский анемометр. «Приборы и техника эксперимента», М. 1993г., №3.
3. Рамазанов Ф.Ф. Автоматизированная система измерения параметров потоков газов в технологических установках. Автореферат диссертации на соискание уч.степени канд.техн.наук. Наб.Челны. КамПИ, 2004г.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ (05.13.00)

05.13.06

¹А.Е. Аблаева, ¹В.В. Слепцов д-р техн. наук,
²И.В. Таржанов канд. техн. наук, ³С.В. Шаныгин канд. техн. наук

¹МИРЭА – Российский технологический университет,
институт комплексной безопасности и специального приборостроения,
кафедра «Приборы и информационно-измерительные системы»,
²ГБОУ Школа № 1537,

³МГТУ им. Н.Э.Баумана,
факультет Робототехника и комплексная автоматизация,
кафедра «Теория механизмов и машин»,
Москва, ¹Anna_Ablaeva@mail.ru, ³sg78dec@mail.ru

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ЕДИНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

В работе представлены результаты исследования влияния источника силового питания ограниченной мощности на показатели качества переходных процессов электроприводов технологических машин.

Ключевые слова: электропривод, единый источник силового питания, переходной процесс.

Автоматизированные электроприводы (ЭП) широко применяются в промышленности в качестве исполнительных устройств, обеспечивающих требуемые перемещения различных технологических машин (ТМ) – промышленных роботов, лазерных технологических установок, координатно-измерительных машин и др., поэтому параметры этих машин во многом зависят от технических характеристик ЭП.

Анализу технических характеристик ЭП посвящено много работ [1,2], однако мало освещённым остался вопрос анализа систем электроприводов, взаимосвязанных через единый источник силового питания (ЕИП).

Для проведения анализа системы ЭП с ЕИП необходимо разработать математическую модель, обеспечивающую учёт особенностей такой системы, в первую очередь колебания напряжения ЕИП, вызванные различными нагрузками отдельных ЭП. Результаты экспериментов показали, что падение напряжения питания может достигать 70% от номинального и вызывается либо разрядом фильтрующих емкостей (аккумуляторов), либо снижением напряжений на согласующих трансформаторах. При этом напряжение питания $U_{нп}$ может быть аппроксимировано следующей функцией:

$$U_{нп} = U_{нпо} \cdot [1 - U_{нп1} - A1 \cdot \sin(\omega1 \cdot t) - A2 \cdot \sin(\omega2 \cdot t)] \quad (1)$$

где $A1 + A2 \leq 1$.

Приняты следующие обозначения:

$U_{нпо}$ – номинальное напряжение питания; $U_{нп1}$ – постоянное напряжение питания; $A1$, $A2$ – амплитуды колебаний напряжения питания; $\omega1$, $\omega2$ – частоты колебаний напряжения питания; t – время.

Рассмотрим систему ЭП промышленного робота РПМ-25, состоящую из 6-ти преобразователей типа ПРШ-102 с датчиками тока, содержащими токовые шунты с устройствами гальванической развязки, электродвигателей МИ-2 и 4МИ-12Ф3 с тахогенераторами типа ТГП-5, датчиков положения абсолютного отсчета типа ФЭП-15 и контроллера ЦПУ-2, входящего в состав устройства управления МПСУ [3]. В такой системе наблюдается взаимовлияние электроприводов через единый источник силового питания,

вызванное ограниченной мощностью силового трансформатора (6 кВт при суммарной номинальной мощности всех электродвигателей 10 кВт). Ограничение по мощности часто наблюдается в технологических машинах, что вызвано конструктивными ограничениями.

Функциональную схему такой системы ЭП можно представить как на рис.1.

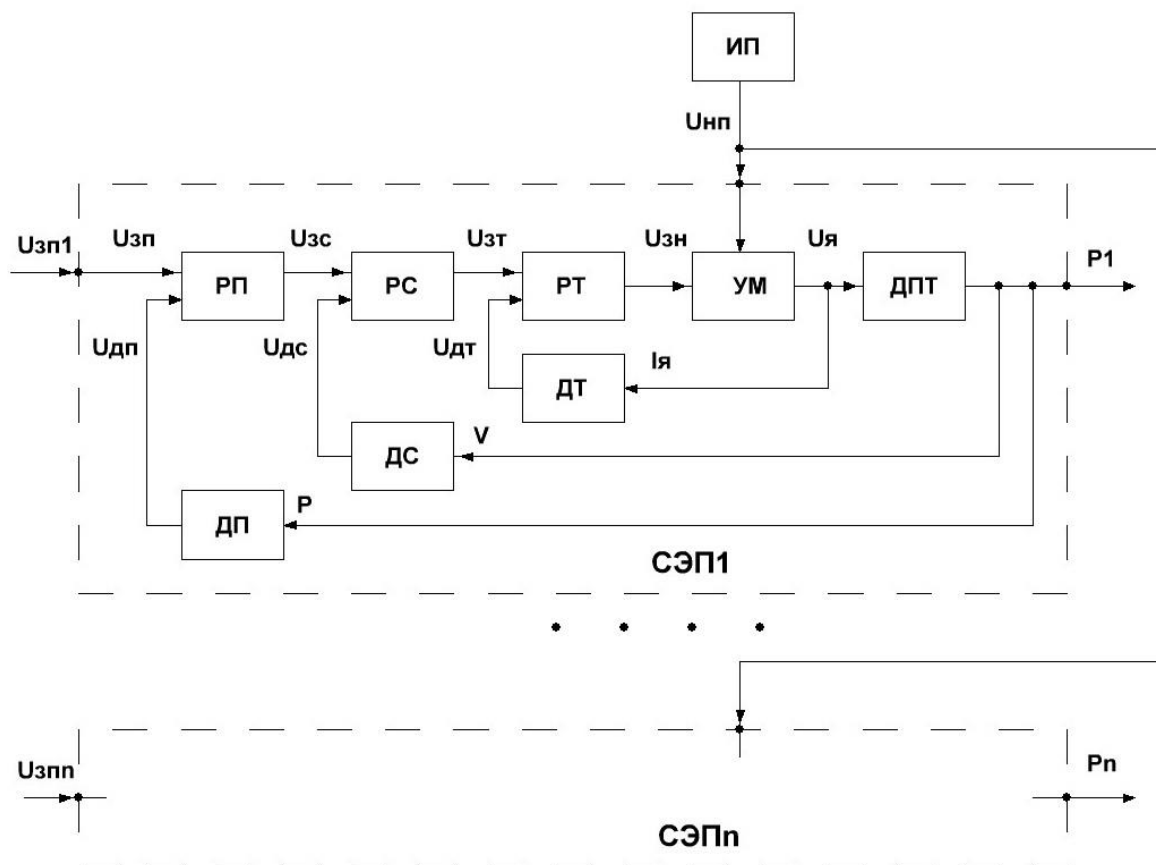


Рис.1– Функциональная схема системы электроприводов с единым источником питания

Приняты следующие обозначения:

СЭП1...СЭПn – следящие электроприводы (1-й ...n-й); РП, РС, РТ – соответственно регуляторы положения, скорости и тока; УМ – усилитель мощности; ДПТ – электродвигатель постоянного тока; ИП – источник силового питания; ДП, ДС, ДТ – соответственно датчики положения, скорости и тока; $U_{зп}$, $U_{зс}$, $U_{зт}$, $U_{зн}$ – соответственно сигналы задания положения, скорости, тока и напряжения; $U_{дп}$, $U_{дс}$, $U_{дт}$ – соответственно сигналы с датчиков положения, скорости и тока; $U_{я}$, $I_{я}$, V , P – соответственно напряжения и ток якоря, скорость и положение исполнительного органа ДПТ; $U_{зп1}...U_{зпn}$ – сигналы задания положения следящих электроприводов; $P1...Pn$ – положения следящих электроприводов; количество степеней подвижности в ТМ, $n = 6$.

Наиболее удобным видом математической модели ЭП является структурная схема, представленная на рис.2 [4] с учетом формулы (1), отображающей взаимовлияние электроприводов через единый источник питания.

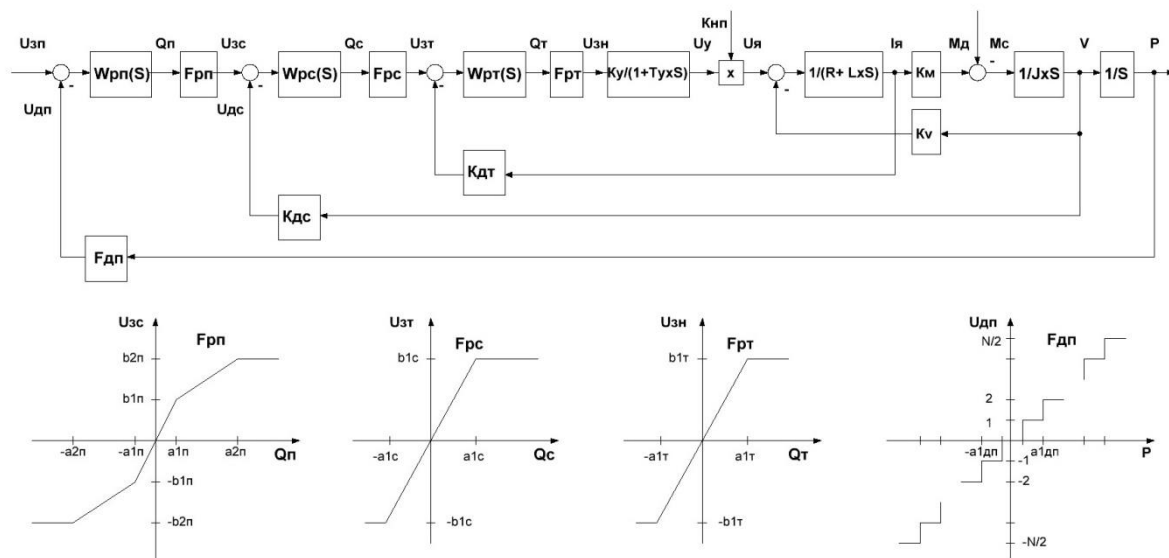


Рис. 2– Обобщенная структурная схема электропривода

Приняты следующие обозначения:

F_{pn} , F_{pc} , F_{pt} – нелинейности регуляторов положения, скорости и тока; F_{dp} – нелинейность датчика положения; $W_{pn}(s)$, $W_{pc}(s)$, $W_{pt}(s)$ – передаточные функции регуляторов положения, скорости и тока; K_y , T_y – коэффициент передачи и постоянная времени усилителя мощности; J – момент инерции электродвигателя; R , L – активное сопротивление и индуктивность электродвигателя; K_v – коэффициент противоЭДС; K_{dt} , K_{dc} – коэффициенты передачи датчиков тока и скорости; Q_p , Q_c , Q_t – сигналы с регуляторов положения, скорости и тока; U_y – выходной сигнал усилителя мощности; M_d – момент электродвигателя; M_c – внешний момент. В большинстве современных ЭП контуры тока и положения настраивают на технический, а контур скорости – на симметричный оптимум. В этом случае:

$$W_{pt}(s) = \frac{(R + L \cdot s)}{2 \cdot K_y \cdot K_{dt} \cdot T_y \cdot s};$$

$$W_{pc}(s) = \frac{K_{dt} \cdot J \cdot (1 + 8 \cdot T_y \cdot s)}{32 \cdot (T_y^2) \cdot K_m \cdot K_{dc} \cdot s}; W_{pn}(s) = \frac{K_{dc}}{8 \cdot K_{dp} \cdot T_y} \quad (2)$$

Моделирование проводилось при следующих параметрах:

$R = 1 \text{ Ом}$; $L = 0.005 \text{ Гн}$; $K_m = 0.23 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}$; $K_v = 0.25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $J = 0.0025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $K_{dt} = 0.2 \frac{\text{В}}{\text{А}}$; $K_{dc} = 0.025 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $K_y = 15$; $T_y = 0.001 \text{ с}$; $a_{1dp} = 0.02 \text{ рад}$; $a_{1p} = 200 \text{ дискрет}$; $a_{2p} = 1000 \text{ дискрет}$; $b_{1p} = 0.5 \text{ В}$; $b_{2p} = 10 \text{ В}$; $a_{1c} = 10 \text{ В}$; $b_{1c} = 10 \text{ В}$; $a_{1t} = 10 \text{ В}$; $b_{1t} = 10 \text{ В}$; $W_{pn}(s) = 0.0025$; $W_{pc}(s) = \frac{3000 \cdot (1 + 0.008 \cdot s)}{s}$; $W_{pt}(s) = \frac{150(1 + 0.005 \cdot s)}{s}$.

Переходные процессы в системе электроприводов при $K_{пн} = 1$ и $K_{пн} = 0.5 + 0.45 \sin(80 \cdot t)$ представлены на рис. 3а и 3б.

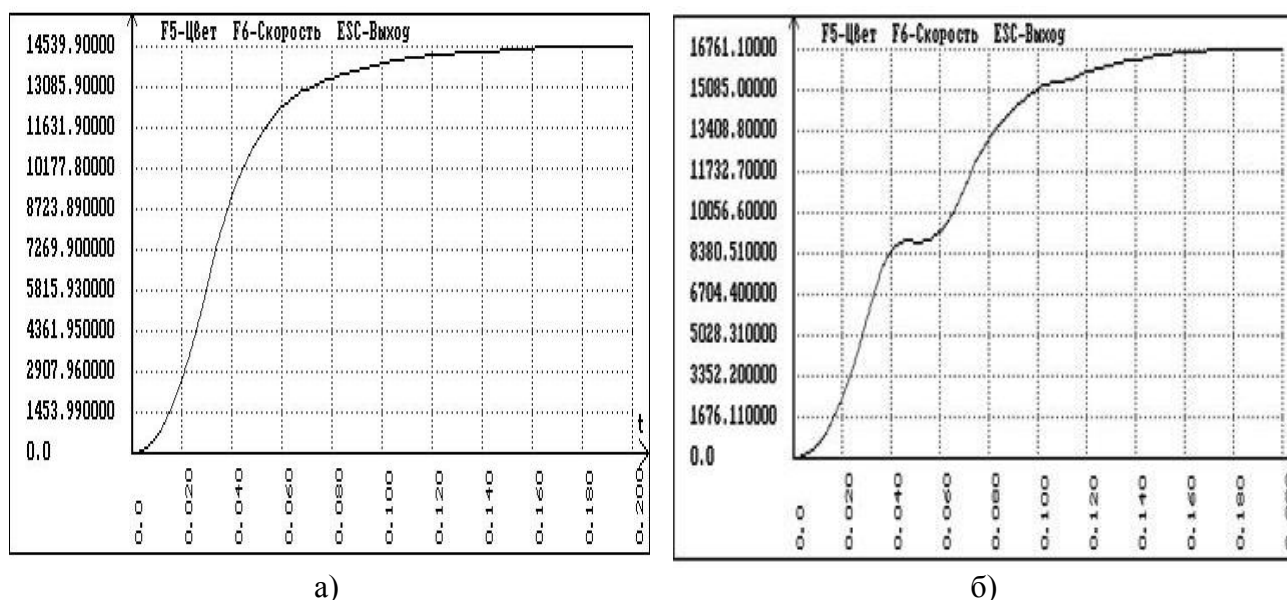


Рис. 3 – Переходные процессы Р при $U_{зп} = 15000$ дискрет,
 $K_{пл} = 1$ (а) и $K_{пл} = 0.5 + 0.45\sin(80 \cdot t)$ (б)

Из рисунка 3 видно, что в такой системе электроприводов зависимость характеристик переходного процесса от провалов напряжения питания значительна – при отсутствии провалов напряжения питания переходной процесс Р носит монотонный (апериодический) характер, а в случае периодических провалов питающего напряжения переходной процесс Р носит колебательный характер. В некоторых случаях, при наличии сопутствующих факторов (например, значительных изменений моментов инерции нагрузки в различных степенях подвижности технологических машин) может наблюдаться даже потеря устойчивости системы ЭП.

Список литературы

1. Автоматизированный электропривод/ [Под общей ред. И.И.Петрова, М.М.Соколова, М.Г.Юнькова]. М.: Энергия, 1980. – 408 с.
2. Слепцов В.В., Аблаева А.Е. Анализ технических характеристик электроприводов промышленных роботов для дуговой сварки // Сборник: Новая наука как результат инновационного развития общества. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2017. – С.69-71.
3. Слепцов В.В. Техническое обслуживание, наладка и ремонт электромеханических промышленных роботов. Учебное пособие/ В.В. Слепцов. – М.: Машиностроение, 1989. – 48 с.
4. Слепцов В.В., Жилин Е.В., Долматова О.Е. Разработка обобщенной математической модели информационно-измерительных и управляющих систем электроприводов постоянного и переменного тока для автоматизированного производства // «Вестник МГУПИ», серия «Приборостроение и информационные технологии», №38, М.: МГУПИ, 2012. – С.42-51.

05.13.00

¹Д.А. Безуглов д-р техн. наук, ²В.В. Воронин канд. техн. наук,
³С.Е. Мищенко д-р техн. наук, ⁴В.И. Юхнов канд. техн. наук

¹Ростовский филиал Российской таможенной академии, ректорат,
²Донской государственный технический университет,
научно-исследовательская лаборатория «Математические методы обработки изображений и интеллектуальные системы компьютерного зрения»,
³Ростовский научно-исследовательский институт радиосвязи,
⁴Северо-кавказский филиал Московского технического университета связи и информатики,
кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи,
Ростов-на-Дону, bezuglovda@mail.ru

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ

В работе рассмотрена эффективность алгоритма пространственной фильтрации телевизионных изображений, искаженных импульсными шумами с использованием сплайн-аппроксимации. Проведено математическое моделирование предложенного подхода и показаны его преимущества. Приведено аналитическое выражение для оценки вычислительных затрат при реализации данного алгоритма по сравнению с методом вейвлет-дифференцирования, иллюстрирующее вычислительную эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: эффективность алгоритма выделения контуров, сплайн-аппроксимация, модуль градиента яркости.

В последнее время интенсивно развиваются системы интеллектуальной обработки телевизионных изображений [1, 2]. При этом в значительной мере возрастает объем хранимой информации и требования к ее достоверности. Одновременно возникает задача оперативной обработки больших массивов цифровой информации. Обеспечение необходимых требований, предъявляемых к современным телевизионным системам технического зрения при решении задач высокой сложности, сопряженными с высокой изменчивостью рабочей сцены, разнородностью объектов, помехами, напрямую связано с задачей повышения эффективности процесса цифровой обработки телевизионных изображений. Бурное развитие высокопроизводительных вычислительных систем в последнее время создаёт условия для появления новых применений и расширения широкого спектра задач, решаемых с помощью систем технического зрения, что свидетельствует об актуальности исследований в области повышения эффективности методов и алгоритмов цифровой обработки изображений.

Рассмотрим эффективность алгоритма выделения контуров телевизионных изображений, предложенного авторами в [3, 4]. Следует отметить, что способ-прототип обеспечивает эффективное подавление шумов, распределенных по нормальному закону, и не предназначен для выделения контуров на зашумленном изображении.

Цель настоящей работы: анализ эффективности алгоритма [3,4] выделения контуров на телевизионных изображениях, искаженных импульсными шумами с использованием сплайн-аппроксимации.

Работоспособность предлагаемого способа выделения контуров производилась в сравнении с получившим практическое распространение методом выделения контуров, основанном на применении маски Собеля (детектор границ «Canny»).

Компоненты градиента яркости входного изображения для рассматриваемого алгоритма могут быть найдены по формулам:

$$G_{n_y,i}^x = \sum_{n_x=2}^{N_x-2} \left(\frac{1}{2} \chi_{xn_x,i}^2 \left(B_{n_y,n_x+2}^x - 3B_{n_y,n_x+1}^x + 3B_{n_y,n_x}^x - B_{n_y,n_x-1}^x \right) + \right. \\ \left. + \chi_{xn_x,i} \left(B_{n_y,n_x+1}^x - 2B_{n_y,n_x}^x + B_{n_y,n_x-1}^x \right) + \frac{1}{2} \left(B_{n_y,n_x+1}^x - B_{n_y,n_x-1}^x \right) \right); \quad (1)$$

$$G_{n_x,i}^y = \sum_{n_y=2}^{N_y-2} \left(\frac{1}{2} \chi_{yn_y,i}^2 \left(B_{n_x,n_y+2}^y - 3B_{n_x,n_y+1}^y + 3B_{n_x,n_y}^y - B_{n_x,n_y-1}^y \right) + \right. \\ \left. + \chi_{yn_y,i} \left(B_{n_x,n_y+1}^y - 2B_{n_x,n_y}^y + B_{n_x,n_y-1}^y \right) + \frac{1}{2} \left(B_{n_x,n_y+1}^y - B_{n_x,n_y-1}^y \right) \right). \quad (2)$$

Модуль градиента яркости найдем по формуле:

$$G(S_{n_x,n_y}) = \sqrt{(G_{n_y,n_x}^x)^2 + (G_{n_x,n_y}^y)^2}. \quad (3)$$

При этом пороговое преобразование описывается соотношением:

$$Q(S_{n_x,n_y}) = \begin{cases} 1, & G(S_{n_x,n_y}) > P; \\ 0, & G(S_{n_x,n_y}) < P. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь P – значение порога.

Для формирования тестовых изображений использовался следующий алгоритм. Матрица яркости S_0 исходного полутонового изображения, в котором отсутствовали шумы, обрабатывалась детектором границ «Canny». В результате было получено изображение контуров Q_0 , соответствующее матрице яркости S_0 при отсутствии шумов. Далее в исходное цифровое полутоновое изображение был добавлен шум (матрица n). В качестве модели шума использовался импульсный шум «битые пиксели» и «соль-перец». В результате были получены изображения, которым соответствуют матрицы яркости $S = S_0 + n$.

Анализ полученных изображений позволяет заключить, что оператор Собеля неработоспособен для выделения контуров на изображениях, полученных в условиях импульсных шумов. С целью количественной оценки эффективности предлагаемого способа по сравнению с прототипом использовались три показателя.

Первый состоял в том, что определялась величина среднеквадратического отклонения (СКО) между изображениями контуров Q , полученными предлагаемым способом, а также способом прототипа и изображением контура Q_0 , полученным при отсутствии шумов.

Оценка СКО осуществлялась по формуле:

$$e = \sqrt{\frac{1}{N_x N_y} \sum_{n_y=1}^{N_y} \sum_{n_x=1}^{N_x} (Q_{0n_y,n_x} - Q_{n_y,n_x})^2}. \quad (5)$$

Второй показатель представляет собой оценку SNR_1 отношения сигнал/шум (ОСШ), рассчитываемую по формулам:

$$\mu = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{n_y=1}^{N_y} \sum_{n_x=1}^{N_x} Q_{0n_y,n_x}, \quad (6)$$

$$SNR_1 = \frac{\max S - \mu}{\sqrt{\frac{1}{N_x N_y} \sum_{n_y=1}^{N_y} \sum_{n_x=1}^{N_x} (Q_{0n_y,n_x} - \mu)^2}}, \quad (7)$$

где $\max S$ – максимальное значение яркости в полутоновых изображениях, которое обычно равно 255.

Значения третьего показателя для оценки эффективности предлагаемого способа для подавления импульсных помех получают при помощи соотношения

$$\sigma_{\text{фон}} = \sqrt{\frac{1}{(N_{\text{фон}})^2} \sum_{i=n_1}^{n_1+N_{\text{фон}}} \sum_{j=m_1}^{m_1+N_{\text{фон}}} (Q_{i,j} - \mu_{\text{фон}})^2}; \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{фон}}$ - СКО фона;

$$\mu_{\text{фон}} = \frac{1}{(N_{\text{фон}})^2} \sum_{i=n_1}^{n_1+N_{\text{фон}}} \sum_{j=m_1}^{m_1+N_{\text{фон}}} S_{i,j} \quad (9)$$

– среднее значение фона; n_1, m_1 – координаты выбранной площадки фона размером $N_{\text{фон}} \times N_{\text{фон}}$ на исследуемом изображении $Q_{i,j}$,

$$SNR_2 = \frac{\max S - \mu_{\text{фон}}}{\sigma_{\text{фон}}}. \quad (10)$$

Результаты данного сопоставления применительно к модели импульсного шума типа «битые пиксели» при различных вероятностях шума $p = 0.3; 0.5$ и значениях коэффициента сглаживания $\rho = 5, 10, 50, 100$ приведены в таблице 1. Аналогичные результаты, относящиеся к импульсному шуму «соль-перец», представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты для импульсного шума типа «битые пиксели»

Показатель 1, выигрыш по среднеквадратическому отклонению $e_{\text{СКО}}$, дБ				
Вероятность шума	Коэффициент сглаживания сплайн-функций			
	5	10	50	100
0.3	1.8	2.01	2.22	2.23
0.5	2.03	2.31	2.6	2.64
Показатель 2, выигрыш по отношению пиковый сигнал/шум SNR, дБ				
Вероятность шума	Коэффициент сглаживания сплайн-функций			
	5	10	50	100
0.3	3.47	4.09	5.22	5.48
0.5	3.76	4.57	5.87	6.32
Показатель 3, выигрыш по отношению пиковый сигнал/шум по СКО фона SNRF, дБ				
Вероятность шума	Коэффициент сглаживания сплайн-функций			
	5	10	50	100
0.3	5.23	6.08	8.11	8.9
0.5	5.41	6.34	8.15	8.94

Таблица 2 – Результаты для импульсного шума «соль-перец»,

Показатель 1, выигрыш по среднеквадратическому отклонению $e_{\text{СКО}}$, дБ				
Вероятность шума	Коэффициент сглаживания сплайн-функций			
	5	10	50	100
0.3	2.51	2.69	2.83	2.81
0.5	2.95	3.23	3.5	3.53
Показатель 2, выигрыш по отношению пиковый сигнал/шум SNR, дБ				
Вероятность шума	Коэффициент сглаживания сплайн-функций			
	5	10	50	100
0.3	5.13	5.77	6.57	6.56
0.5	5.4	6.15	7.16	7.44

Показатель 3, выигрыш по отношению пиковый сигнал/шум по СКО фона SNRF, дБ				
Вероятность шума	Коэффициент сглаживания сплайн-функций			
	5	10	50	100
0.3	6.17	7.08	9	9.69
0.5	6.07	7.05	8.99	9.79

Оценим выигрыш предлагаемого способа по сравнению с алгоритмом вейвлет-дифференцирования [5] по быстродействию. Пусть распределение яркости изображения задает квадратная матрица S размером $M \times M$.

При этом прямое дискретное вейвлет-преобразование для строк и столбцов в способе-прототипе осуществляется по формулам

$$W_x(m, n, i) = \sum_{j=0}^{N-1} \varphi(m, n, j) S_{i,j}, \quad W_y(m, n, j) = \sum_{i=0}^{N-1} \varphi(m, n, i) S_{i,j} \quad (11)$$

Здесь $\varphi(m, n, j)$ – вейвлет.

В этом случае объем вычислительных затрат O_w при реализации прямого вейвлет-преобразования будет равен:

$$O_w = 2M^3 \ln M. \quad (12)$$

В выражении (13) учтено, что $N = \ln M$.

Если выбранному виду вейвлета соответствует его производная, то обратное преобразование, позволяющее получить компоненты градиента яркости исходного изображения, можно найти по формулам

$$G_{i,j}^x = C_\psi \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} W_x(m, n, i) \frac{\partial \varphi(m, n, x_j)}{\partial x}, \quad (13)$$

$$G_{i,j}^y = C_\psi \sum_{m=1}^M \sum_{n=0}^{N-1} W_y(m, n, j) \frac{\partial \varphi(m, n, y_i)}{\partial y}, \quad (14)$$

где C_ψ – коэффициент нормировки для обратного вейвлет-преобразования (для приведенных соотношений данный коэффициент равен единице).

Обратное преобразование потребует также O_w операций. С учетом того, что модуль градиента яркости изображения будем определять по формуле (3) итоговое количество операций для выделения контуров будет составлять

$$O_{w\Sigma} = 2(2M^3 \ln M) + 4M^2. \quad (15)$$

Для реализации предлагаемого алгоритма выделения контуров с использованием сплайн-аппроксимации необходимо $2M$ раз решить систему линейных уравнений размерностью M . Для обращения матрицы такой системы уравнений потребуется порядка $2M^3$ операций. Так как коэффициенты матрицы совпадают для всех строк и столбцов, то матрицу A необходимо обратить один раз. Так как матрицу можно обратить заранее, для всех вычислений используется одна матрица, изменяется только правая часть системы уравнений. Для вычисления контура необходимо еще $40M^2$ операций. В результате общее число операций при реализации предлагаемого способа составит

$$O_{s\Sigma} = 2M^3 + 40M^2. \quad (16)$$

Отсюда следует, что выигрыш в вычислительной эффективности, равный отношению числа операций в алгоритме-прототипе и предлагаемом алгоритме будет равен:

$$W = \frac{O_{w\Sigma}}{O_{s\Sigma}} = \frac{2(2M^3 \ln M) + 4M^2}{2M^3 + 40M^2} = \frac{2M \ln M + 2}{M + 20}. \quad (17)$$

Как правило, $M \gg 20$. В этом случае

$$W \approx 2 \ln M. \quad (18)$$

Например, при $M = 512$ выигрыш составит $W = 16$ раз.

Выводы: Таким образом, известные способы выделения контуров на полутоновых изображениях малоэффективны в условиях импульсных помех, а предложенный алгоритм [3,4], обеспечивающий решение задачи выделения контуров на зашумленных изображениях является устойчивым к воздействию импульсных помех и позволяет увеличить скорость выделения контуров полутоновых изображений.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках постановления № 218 "О мерах государственной поддержки ..., в рамках подпрограммы "Институциональное развитие научно-исследовательского сектора" государственной программы РФ "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы", (контракт № 03.G25.31.0284).

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. -М.: Техносфера, 2005. 1072с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB.-М.: Техносфера, 2006, 616с.
3. Безуглов Д.А., В.В. Воронин В.В., Мищенко С.Е., Юхнов В.И Алгоритм выделения контуров на телевизионных изображениях, искаженных импульсными шумами с использованием сплайн-аппроксимации // Научно-технический вестник Поволжья, 2019, №1 С. 97
4. Безуглов Д.А., Крутов В.А., Швачко О.В. Метод дифференцирования сигналов с использованием сплайн-аппроксимации // Фундаментальные исследования, 2017, № 4-1, С.24-28.
5. Bezuglov D.A., Kuzin A.P., Voronin V.V. Contour detection based on wavelet differentiation // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering "Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications 2016" 2016. С. 986-900.

05.13.12

П.Н. Гаряев канд. техн. наук

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет",
кафедра Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве,
Москва, p.garyaev@gmail.com

БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

В статье представлены результаты анализа применения современных информационных технологий при обработке больших объемов данных с целью извлечения полезной информации для строительной отрасли. Рассмотрены текущее состояние и будущий потенциал таких технологий в предметных областях строительной отрасли.

Ключевые слова: *большие данные, Big Data, информационное моделирование, BIM, облачные вычисления.*

Развитие информационных технологий ведет к постоянному росту структурированных и неструктурированных объемов данных (Big Data). Сегодня компаниям приходится иметь дело с петабайтами данных. Google обрабатывает свыше 30 петабайт данных в день, в то время как Facebook получает более 10 миллионов фотографий в час. Предположительно, к 2020 году объем данных в интернете возрастет до 44 зеттабайтов. Этот лавинообразный рост данных позволяет решать огромное количество задач и создавать новые направления исследований. Сегодня Big Data сравнивают с нефтью нашего времени. Доступность больших данных позволяет по-новому смотреть на различные области деятельности человека. Строительная отрасль не является исключением. На нее также оказывает существенное влияние цифровая революция.

Одним из таких направлений является информационное моделирование зданий (BIM), предназначенное для сбора многомерной информации о строительном объекте, с поддержкой междисциплинарного сотрудничества заинтересованных сторон. Данные BIM, как правило, в 3D кодировании сжатые в различные проприетарных форматах. Эти разнообразные собранные в модели BIM данные, которые постоянно пополняются в процессе проектирования, строительства и эксплуатации и сохраняются после окончания срока службы объектов. BIM файлы модели здания легко достигает 100 Гб в размере. Эти данные в любом формате и форме имеют огромную ценность для отрасли.

С появлением встраиваемых устройств и датчиков, объекты начинают генерировать массивные данные на этапе эксплуатации и технического обслуживания, что в конечном итоге приводит к резкому росту данных о строительном объекте. Это огромное количество BIM данных подталкивает строительную индустрию в эру больших данных. Большие данные имеют определенные параметры, во-первых, их объем (терабайты, петабайты, эксабайты данных и т.д.); во-вторых, разнообразие разнородных форматов данных, такие как текст, аудио, видео, графики, данные с датчиков и многое другое и в-третьих, скорость передачи.

Строительные данные огромны из-за больших объемов проектных данных, графиков, корпоративной ресурсной плановой системы (ERP), финансовых данных и т.д. Разнообразие данных о сооружении можно классифицировать по различным форматам файлов, поддерживаемым в строительных программах и приложениях. Кроме того, строительные данные носят динамический характер, который вытекает из потоковой природы источников данных, таких как датчики, RFID и BMS (система управления зданием). Использование этих данных для оптимизации проектирования, строительства и эксплуатации следующий рубеж инноваций в отрасли.

На сегодняшний день становятся очень важными задачи разработки методов оценки параметров больших данных, определение подходов к их структурированию, накоплению, проверке и хранению, а также определение взаимосвязи форматов и их потоковой передачи. Конкурентным преимуществом становится способность трансформировать результаты анализа больших данных для идентификации, понимания и реагирования на скрытые тенденции с целью принятия управленческих решений.

В области анализа больших данных существует много направлений, однако в упрощенном виде их принято делить на две категории: Big Data engineering и Big Data Analytics (Scientist). Несмотря на то, что эти направления взаимосвязаны, они отличаются друг от друга.

Big Data engineering занимается проектированием системы обработки, сбора и хранения данных, позволяющей обрабатывать петабайты данных и предоставляющей доступ различным пользовательским приложениям к результатам обработки данных. Для этого требуются специалисты, имеющие хорошие навыки программирования, знающие сетевые технологии, умеющие взаимодействовать через интернет и профессионально работать с компьютерным оборудованием.

Big Data Analytics занимается поиском закономерностей в больших массивах данных, полученных из готовых систем, разработанных Big Data engineering. Направление анализа данных само по себе достаточно обширное и включает в себя такие специализации, как Data Mining, Text Mining, Visual Mining, OLAP, Process Mining, Web mining, Real-Time Data Mining, Stream Mining, Multimedia Mining, Spatiotemporal Data Mining, Information Network Analysis, Biological Data Mining, Financial Data Mining

Анализ больших данных включает в себя разработку различных систем классификации и прогнозирования с целью изучения тенденций и закономерностей с последующей интерпретацией результатов.

Для работы с анализом данных требуются специалисты, владеющие методами поиска, отбора, группировки, анализа, интеграции и визуализации данных.

Одним из доступных средств обработки Big Data являются платформы с открытым кодом Apache Hadoop и Apache Spark, позволяющие обрабатывать огромные объемы слабоструктурированных данных из разнородных источников. Платформы позволяют анализировать data lake (озера данных) веб-сайтов, финансового анализа, научных исследований, создавать шины микросервисов для обработки данных в реальном времени, например - сегментации посетителей сайтов, обнаружения мошенничества, мониторинга транспорта и т.д.

Однако исследования с использованием обработки больших строительных данных редко используются для обработки данных информационных моделей зданий BIM, поскольку данные переплетены и весьма относительно и их сложно распределить по разным блокам Hadoop. Такое размещение приводит к ухудшению производительности запросов из-за увеличения дискового ввода-вывода, необходимого для объединения разреженных данных вместе для анализа. Чтобы преодолеть это, необходимо разработать модуль предварительной обработки и разделения данных, позволяющий анализировать и разбивать логически релевантные части данных BIM (по номеру этажа или семейству материалов), с сохранением их в смежных местах Hadoop. Для максимального использования центрального процессора необходимо вводить многопоточность во время анализа данных.

На основании вышесказанного можно настроить Hadoop для данных BIM, а компоненты запросов реализовать в виде приложений для обнаружения коллизий и оценки количества информационных моделей. Цель исследования состоит в разработке интерактивного пользовательского интерфейса для запросов данных, на основе обработки естественного языка для извлечения очень сложных данных BIM.

Big Data Analytics имеет богатые интеллектуальные традиции, заимствованные из самых разных областей знаний. Традиционно многие смежные дисциплины преследуют одну и ту же цель - находить полезные шаблоны в данных. К этим смежным областям относятся: статистика, интеллектуальный анализ данных, прогнозная аналитика, бизнес-аналитика,

обнаружение знаний из данных, аналитика данных, Data Science и теперь Big Data. Анализ больших данных включает в себя многие методы, которые уже были разработаны ранее. Эффективный анализ начинается с правильно настроенного сбора данных, позволяющего формулировать достоверные выводы, поэтому большая часть представленной работы сосредоточена на анализе больших данных.

Облачные вычисления Big Data - это парадигма Интернет-вычислений, в которой к общему пулу настраиваемых ресурсов предоставляется доступ по требованию. Идея подхода заключается в передаче хранения данных и выполнения вычислений сторонним центрам обработки данных.

В результате появляется возможность одновременно получать доступ к облачным сервисам нескольким пользователям без необходимости приобретать отдельные лицензии. Облачные сервисы предлагают три варианта обслуживания. Первый - инфраструктура как услуга (IaaS). В IaaS пользователю предоставляется доступ для управления виртуальными компьютерами и услугами облачной сети. Второй - платформа, как услуга (PaaS). В PaaS пользователю предоставляются услуги, относящиеся, в частности, к средам разработки, таким как операционные системы, языки программирования или базы данных. Третий сервис - предоставление программного обеспечения как услуги (SaaS). В SaaS предоставляется доступ к приложениям, например таким как Revit 360, через Интернет. Облачные вычисления широко применяются в строительной отрасли, поскольку они поддерживают интеграцию задач в BIM-приложениях. Автор использовал облако для контекстно-зависимых вычислений на основе BIM. Были подключены Google SketchUp, Google Apps, Autodesk BIM 360 и Viewpoint, в облаке Amazon EC2 для поддержания большинства функций дизайнеров. Была предпринята попытка интеграции облачных вычислений с новейшими технологиями, такими как VR/AR и бизнес-сервисами социальных сетей, создающими виртуальную среду для лучшей визуализации и понимания моделей BIM. Облачные вычисления могут существенно ускорить внедрение ИТ в строительной отрасли, преобразовав многие специфичные задачи в проектировании, возведении и эксплуатации зданий. Роль больших данных в этом преобразовании огромна.

Список литературы

1. Гранкин С.Л., Гаряев Н.А. Применение вычислительной сети физических объектов/ Научное обозрение. 2015. № 13. С. 159-162.
2. Кузнецова К.К., Гаряев П.Н. Применение 4D BIM-технологий для управления архитектурным проектом. В сборнике: Дни студенческой науки Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института экономики, управления и информационных систем в строительстве и недвижимости. 2016. С. 300-304.
3. Системы автоматизации проектирования в строительстве: учебное пособие под ред. А.В.Гинзбурга / -М.: МГСУ, 2014. - 664 с.
4. Гаряев П.Н., Гинзбург А.В., Конев А.С. Модель многокритериальной многослойной системы оценки на основе нечеткой логики. Перспективы науки. 2017. № 8 (95). С. 13-15.

05.13.18

С.В. Ерохин канд. техн. наук, Е.М. Гусакова

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет,
кафедра прикладной математики,
Москва, ErokhinSV@mgsu.ru

РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ДРОБНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

В работе построены разностные схемы для дифференциальных уравнений с производной дробного порядка. Подобные уравнения возникают при моделировании ползучести для вязкоупругих материалов. Показана устойчивость и сходимость численного метода.

Ключевые слова: ползучесть, вязкоупругость, производная дробного порядка, разностная схема.

В работе [1] было установлено, что модель с использованием производной дробного порядка является наиболее подходящей для описания ползучести материалов, обладающих вязкоупругими свойствами. К таковым, например, относятся некоторые виды полимеров, бетонов и др. Возникающие при этом дифференциальные уравнения требуют специальных разностных схем для численного решения.

Для наилучшего описания ползучести воспользуемся обобщенной моделью Фойгта, в которой вязкий элемент заменен вязкоупругим (рис. 1).

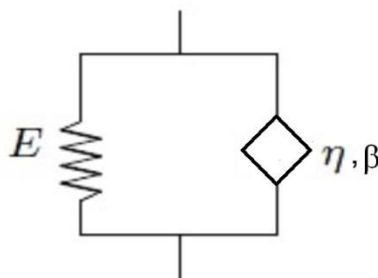


Рис.1- Обобщенная модель Фойгта

Уравнение ползучести при произвольной (например, периодической) функции нагрузки имеет вид:

$$\begin{aligned}\sigma(t) &= E\varepsilon(t) + \eta D^\beta \varepsilon(t) \\ \varepsilon(0) &= \frac{\sigma(0)}{E}.\end{aligned}\quad (1)$$

Начальное условие определяется упругим элементом в обобщенной модели Фойгта.

Согласно теореме Барретта [2] задача Коши (1) имеет единственное решение. Составим разностную схему для ее численного решения на отрезке $[0, T]$, где T – любой наперед заданный отрезок времени.

Определение параметра β для конкретного материала по экспериментальным данным является важной и сложной задачей, которая рассматривалась, например, в работе [4].

Если в модели (1) определен порядок дробной производной, то, по аналогии с [3] можно составить разностные схемы для численного решения уравнений при произвольных (а не только постоянных) значениях нагрузки.

Запишем дробную производную из (1) согласно определению [5] в виде

$$D^\beta \varepsilon(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \left(\frac{\varepsilon(0)}{t^\beta} + \int_0^t \varepsilon'(\tau)(t-\tau)^{-\beta} d\tau \right). \quad (2)$$

Используем стандартное разбиение отрезка $[0, T]$ с шагом h на N равных частей ($Nh = T$) и обозначим $t_i = ih$, $\varepsilon_i = \varepsilon(t_i)$, $\sigma_i = \sigma(t_i)$, $i = 0, \dots, N$.

Аппроксимируем первую производную разностным аналогом

$$\varepsilon'(t) = \frac{\Delta \varepsilon_{k-1}}{h} = \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}}{h}, \forall t \in [t_{k-1}, t_k]$$

Для дробной производной, учитывая (2) и начальные условия, можно записать разностное выражение в узлах сетки:

$$D^\beta \varepsilon(t_i) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \left(\frac{\sigma(0)}{Et_i^\beta} + \sum_{k=1}^i \int_{t_k}^{t_{k+1}} \frac{\Delta \varepsilon_{k-1}}{h} (t_i - \tau)^{-\beta} d\tau \right) =$$

$$= \frac{1}{h\Gamma(2-\beta)} \sum_{k=1}^i \Delta \varepsilon_{k-1} (t_{i-k+1}^{1-\beta} - t_{i-k}^{1-\beta}) + \frac{\sigma(0)}{\Gamma(1-\beta)Et_i^\beta} = \frac{h^{-\beta}}{\Gamma(2-\beta)} \sum_{k=1}^i \Delta \varepsilon_{k-1} \Delta S_{i-k}^\beta + \frac{\sigma(0)}{\Gamma(1-\beta)Et_i^\beta}$$

где $\Delta S_{i-k}^\beta = x_{i-k+1}^\beta - x_{i-k}^\beta$.

Таким образом, разностный аналог задачи (1) записывается в виде системы линейных уравнений

$$\frac{h^{-\beta}}{\Gamma(2-\beta)} \sum_{k=1}^i \Delta \varepsilon_{k-1} \Delta S_{i-k}^\beta + \frac{\sigma(0)}{\Gamma(1-\beta)Et_i^\beta} + E\varepsilon_i = \sigma_i, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N-1$$

Преобразуем систему (2.57) к классической форме, группируя слагаемые вокруг неизвестных значений ε_i

$$\frac{h^{-\beta}}{\Gamma(2-\beta)} \sum_{k=1}^i (\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}) \Delta S_{i-k}^\beta + E\varepsilon_i = \sigma_i - \frac{\sigma(0)}{\Gamma(1-\beta)Et_i^\beta},$$

$$\frac{h^{-\beta}}{\Gamma(2-\beta)} \sum_{k=1}^{i-1} \varepsilon_k (\Delta S_{i-k}^\beta - \Delta S_{i-k-1}^\beta) + \varepsilon_i \left(\frac{h^{-\beta} \Delta S_0^\beta}{\Gamma(2-\beta)} + E \right) = \sigma_i - \frac{\sigma(0)}{\Gamma(1-\beta)Et_i^\beta} + \frac{h^{-\beta}}{\Gamma(2-\beta)} \varepsilon(0) \Delta S_{i-1}^\beta, \quad (4)$$

Таким образом, матрица системы (4) имеет простую треугольную форму, что значительно упрощает вычисление значений функции $\varepsilon(t)$ в узлах сетки.

Согласно [6], разностная схема (4) устойчиво сходится в узлах сетки и может быть использована для решения дифференциальных уравнений вида (1).

Список литературы

1. *Ерохин С.В.* Модели ползучести и релаксации материалов с использованием производных дробного порядка. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. №6. Москва. 2014. – с. 35-39.
2. *Barrett J. H.* Differential equation of non-integer // *Canad. J. Math.* 1954. V. 6, №4. P. 529-541.
3. *С.В. Ерохин, Л.Ю. Фриштер, В.Д. Петелина, Н.М. Чиганова.* Разностные схемы для математического моделирования высокоэластичной деформации. Научно-технический вестник Поволжья. №6. Казань. 2017. – с. 193-196
4. *Ерохин С. В., Алероев Т. С., Фриштер Л. Ю., Колесниченко А. В.* Параметрическая идентификация математической модели вязкоупругих материалов с использованием производных дробного порядка. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* Volume 11, Issue 3, 2015, стр. 82-85.
5. *Самко С. Г., Килбас А. А., Маричев О. И.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск, изд - во "Наука и техника", 1987, 688 стр.
6. *Aleroev T. S., Aleroeva H. T., Ning-Ming Nie, Yi-Fa Tang.* Boundary Value Problems for Differential Equations of Fractional Order. *Mem. Differential Equations Math. Phys.* 49 (2010), pp. 19-82.

05.13.00

Е.А. Серова, канд. техн. наук, Л.А. Шилова канд. техн. наук

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
кафедра Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве,
Москва, SerovaEA@mgsu.ru

РИСКИ ПРИМЕНЕНИЯ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

В настоящей статье рассмотрена проблематика применения BIM-технологий при проектировании объектов транспортной инфраструктуры, связанная с необходимостью учета ГИС-форматов и реализации имитационного моделирования транспортной ситуации. В процессе исследования выявлены рискообразующие факторы, определены виды рисков применения BIM-технологий при проектировании объектов транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: *BIM-технологии, риск, факторы риска, объекты транспортной инфраструктуры, ГИС-модель, имитационное моделирование.*

Применение BIM-технологий является неотъемлемой частью современного процесса проектирования. Информационное моделирование представляет собой в первую очередь набор данных по объекту, объединенных в определенной информационной системе. Для решения данной задачи в настоящее время представлено множество программных продуктов как импортного, так и российского производства (Revit, ArchiCAD и др.). Выбор конкретного программного продукта зависит от задач проекта, требуемого количества данных по объекту и его отраслевой классификации. [1]

Очевидными «плюсами» информационного моделирования являются:

- ясность представления информации по проектируемому объекту, что наиболее актуально при проектировании инженерных систем и конструктивных элементов зданий, где, в случае достаточной детализации, все сложные узлы и решения получают наглядное представление, понятное всем участникам проекта (пример визуализации совмещения инженерных систем здания показан на рис.1);
- согласованность решений проекта, которая проявляется в увязке проектных решений со смежными подразделениями и своевременном выявлении коллизий (пример решения совмещения инженерных систем здания также можно увидеть на рис.1);
- гибкость процесса работы над проектом, связанная с удобством корректировки проектных решений информационной модели, изменением библиотек элементов и их атрибутов, а также анализом эффективности применяемых решений по объекту.

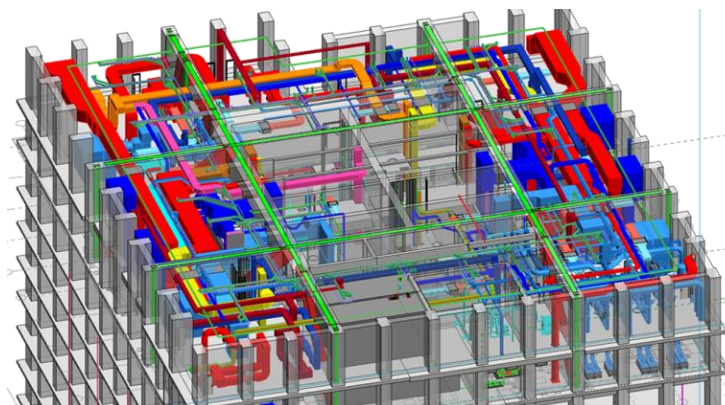


Рис. 1- Здание жилого комплекса в г. Санкт-Петербург

К перечисленным пунктам можно добавить уменьшение количества времени, требуемого для проверки проектных решений, и отсутствие необходимости постоянной печати на бумажный носитель обновленных материалов.

Проблемными вопросами, связанными с рисками применения BIM-технологий, в общем случае, являются:

- качество данных информационной модели, связанное, как с фактическим наличием корректной информации по проекту, так и с нормативной базой, отвечающей за классификацию и стандартизацию элементов информационной модели;
- согласованность форматов данных, в том числе концепция Open BIM;
- хранение данных модели, связанных с большим объемом информации, сложной организационной структурой файловой системы, необходимой для удобства одновременной работы над проектом, и другие классические вопросы хранения и работы с базами данных;
- формирование базы нормативных документов и стандартов, необходимых для развития BIM-технологий в России [2];
- надежность и безопасность хранения данных информационной модели.

Большинство перечисленных выше проблем связано с внедрением и развитием систем автоматизированного проектирования (САПР) при реализации объектов, но, существует и отраслевая специфика применения BIM-технологий, например, при проектировании объектов транспортной инфраструктуры.

Основным отличием информационного моделирования транспортных объектов является наличие большого объема данных, связанное со значительной протяженностью объектов, которая часто измеряется десятками и сотнями километров. Задача применения BIM-технологий осложняется необходимостью совмещения BIM-модели и ГИС-форматов данных.

Это вызвано необходимостью добавления в информационную модель данных по земельным участкам, существующей транспортной сети (трассировка, остановочные пункты, характеристики улично-дорожной сети), инженерно-геологических и гидрогеологических данных, зонирования, аэрофотосъемки и других географических, технических и социологических данных.

При этом в составе информационной модели проекта транспортной инфраструктуры будут присутствовать объекты капитального строительства – мосты, эстакады, тоннели, транспортно-пересадочные узлы и другие сооружения, что накладывает высокие требования к уровню детализации элементов модели.

Важным критерием качества разработки транспортного проекта является обоснование проектных решений с помощью имитационного моделирования различных параметров транспортного проекта, в том числе моделирования пешеходных и транспортных потоков, которое представляет собой поведенческое моделирование участников транспортной ситуации (пешеходов и транспортных средств) с учетом существующих условий проекта.

Моделирование транспортных проектов подразделяется в соответствии с задачами проекта на макро моделирование (исследование пассажирских и транспортных потоков в масштабе городской агломерации) и микро моделирование (или динамическое моделирование) пешеходных и транспортных потоков. Для реализации задач транспортного моделирования в течении последних десяти лет в России представлены ведущие мировые программные продукты, такие как VISUM, VISSIM, Cube, AIMSUN, TransCAD и др. [3]

Современной тенденцией развития САПР для проектирования транспортных объектов (InfraWorks, Civil 3D и др.) является добавление различных модулей для реализации динамического моделирования, например, расчета пассажирских и транспортных потоков, расчета водных потоков и др.

В дополнение к изложенному стоит добавить, что стоимость ошибки при проектировании транспортного объекта значительно выше, чем объекта капитального строительства. И корректное применение BIM-технологий является объективной необходимостью, связанной не только с техническими аспектами, но и с высокими финансовыми рисками проекта.

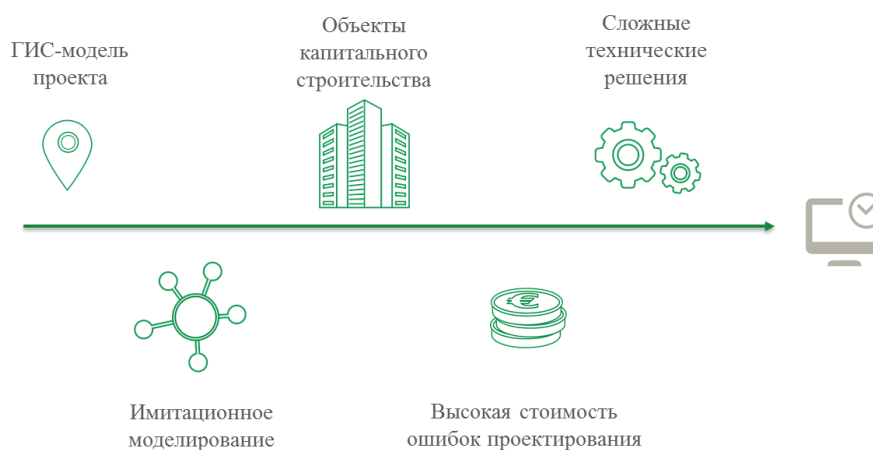


Рис. 2- Рискообразующие факторы применения BIM-технологий при проектировании объектов транспортной инфраструктуры

На основании проведенного качественного анализа факторов риска применения BIM-технологий при проектировании объектов транспортной инфраструктуры, представленных на рис. 2, можно выделить следующие виды рисков:

- риск исходных данных (их качества и объема) для формирования информационной модели;
- риск совместимости форматов данных;
- риск хранения данных информационной модели, связанный с большим объемом информации данных ГИС, а также надежностью и безопасностью хранения данных;
- риск интеграции дополнительных функциональных возможностей для реализации макро- и микромоделирования транспортных проектов;
- риск различия технических требований к проектным решениям в нормативных документах на территории России и других стран (корректировка/ дополнение библиотек и др.)

Учет и анализ выявленных рисков позволяет повысить эффективность проектных решений при проектировании объектов транспортной инфраструктуры и определить тенденции в развитии САПР, которая отразится на качестве технических решений и скорости разработки проектов.

Список литературы

1. Гинзбург А.В., Л.А. Шилов, Л.А. Шилова Современное состояние развития систем автоматизированного проектирования в Российской Федерации – Тамбов: Изд-во: Перспективы науки, 2018, 105-112
2. Гинзбург А.В., Л.А. Шилов, Л.А. Шилова Современные стандарты информационного моделирования в строительстве – М.: Изд-во: НО, 2017, с.16-20
3. Транспортное моделирование: методологические основы, программные средства и практические рекомендации / [Под общ. ред. В.В. Донченко.] – М.: Автополис-плюс, 2008 — 112 с.

05.13.00

Л.А. Шилов, Л.А. Шилова канд. техн. наук

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
кафедра Информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве,
Москва, Leonid.A.Shilov@gmail.com

ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ СТРОИТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ

В работе описывается подход к управлению жизненным циклом строительного объекта, основанный на анализе концепции внедрения информационной модели, содержащей различные состояния строительного объекта.

Ключевые слова: *строительный объект, жизненный цикл, Big Data, BIM, каталог решений.*

Вопросам развития использования технологии информационного моделирования посвящено достаточное количество публикаций, как в России, так и за рубежом [1]. Много внимания уделяется, и уже накоплен определенный положительный опыт, в области нормирования внедрения BIM технологий [2]. Однако, недостаточно изученными остаются аспекты, связанные с принятием решений на различных стадиях существования объекта, рассмотренные в качестве единой информационной системы.

Вместе с тем, активное использование и внедрение информационных технологий поддерживается и мотивируется Правительством Российской Федерации, что подтверждается законодательными актами.

В 2017 г. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р утверждена программа «Цифровая экономика Российской Федерации».

Развитие строительной отрасли неразрывно связано с использованием передовых технологий, последних достижений науки и техники, а тенденция активного внедрения технологий информационного моделирования прочно связана с данными в цифровой форме, которые также являются ключевым фактором производства во всех сферах социально-экономической деятельности.

Вместе с тем, если говорить о жизненном цикле строительного объекта, то необходимо понимать, что речь идет о последовательности процессов существования объекта от идеи его возведения до ликвидации (утилизации). Наиболее важными этапами жизненного цикла при этом, на взгляд авторов, являются: проектирование, строительство и эксплуатация, на этапе которой важнейшую роль играет наблюдение за строительным объектом. Именно на основе наблюдений (периодических осмотров) и принимаются решения о ремонте/реконструкции или сносе объекта.

Данные этапы являются ключевыми в жизненном цикле строительного объекта и именно поэтому эффективность принятых решений на этих этапах оказывает влияние на весь жизненный цикл объекта в дальнейшем.

Использование технологий информационного моделирования.

На данный момент практика проектирования строительных объектов позволяет создавать информационные модели, содержащие информацию об единовременном состоянии строительного объекта (как правило это этапы проектирования или строительства). В связи с чем, следующим логическим шагом видится объединение этих состояний в один информационный поток, содержащий различные данные различных состояний.

На рис.1 представлена концепция объединения различных состояний строительного объекта, находящихся на различных этапах жизненного цикла. Для наглядности на объекте показан параметр A_1 , характеризующийся 3 показателями, которые отслеживаются (наблюдаются) в различных состояниях данной модели.

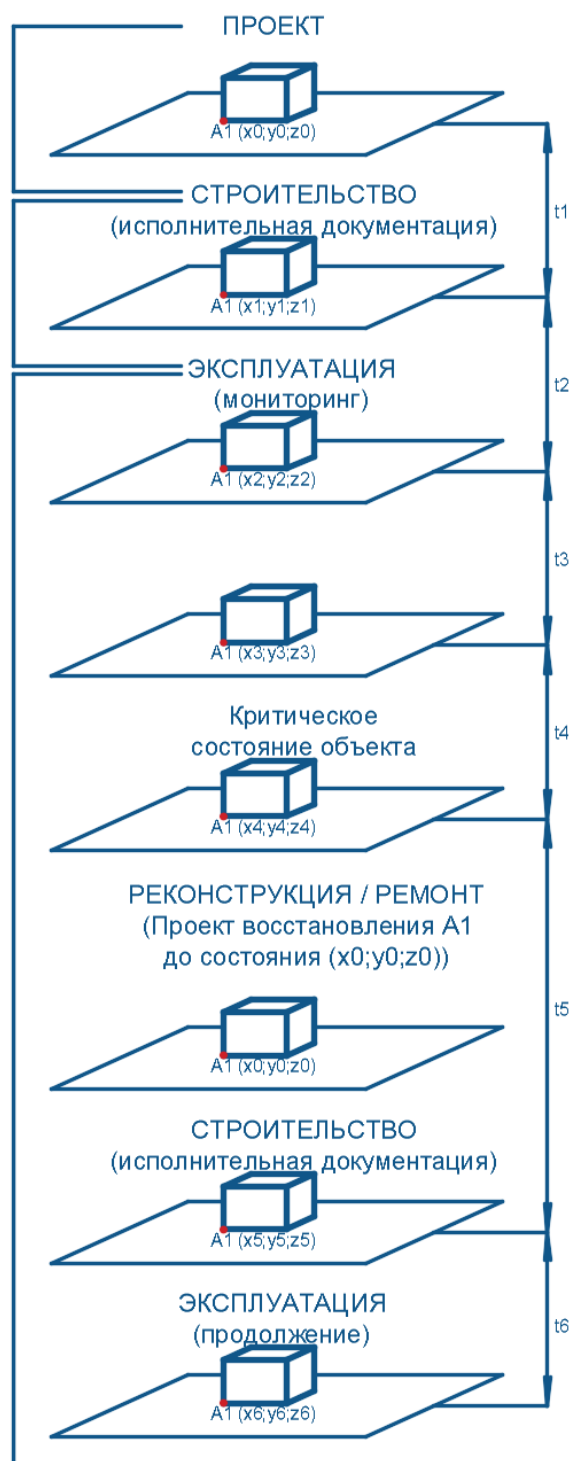


Рис.1- Информационная модель, объединяющая различные состояния объекта в единый информационный поток

Изменение одного из параметров (в нашем примере - A_1), описывающих состояние строительного объекта с течением времени показано на рис.2. Показатели параметра A_1 , на различных этапах существования объекта, могут принимать различные значения. И таких параметров, может быть бесконечное множество: начиная от геометрических и физико-механических свойств, заканчивая наблюдениями за температурой, расходами (например, гидротехнических сооружений и т.д.).

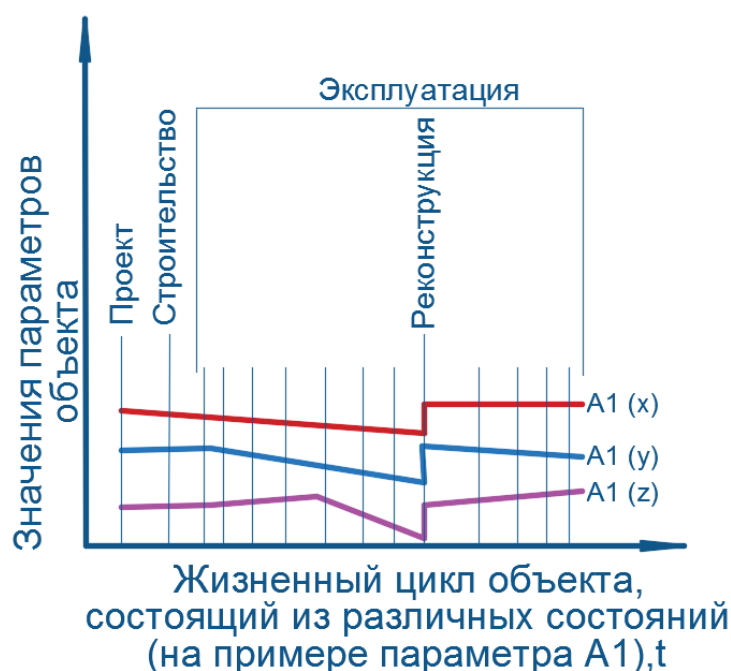


Рис.2- Основные этапы жизненного цикла строительного объекта, представленные в виде информационного потока

В рамках развития концепции цифровой экономики возникает необходимость в создании подобных моделей (баз данных, содержащих огромное количество так называемых больших данных (Big Data)), с целью анализа эффективности принятых проектных решений, на различных стадиях жизненного цикла объекта. Полученные результаты по собранным проектным решениям (принятым на стадии проекта и на стадиях проектов по реконструкции) целесообразно представлять в виде каталога решений. При этом, оценкой эффективности каждого такого решения - видится соотношение таких показателей, как затраты ко времени жизни проектного решения.

Такие BIM модели, содержащие огромные массивы данных, позволят прогнозировать поведение сооружения во времени (на основе машинного обучения, заложив имеющиеся состояния объекта) и давать рекомендации по «уходу» за проектными решениями на стадии эксплуатации.

Стоит еще раз подчеркнуть, что на стадии эксплуатации, использование выбранного решения, за счет наработанной базы выявленных дефектов и способов их устранения (каталога решений), позволит сократить сроки создания проектной документации по реконструкции объекта, а так же (в некоторых случаях) и вовсе отказаться от проектной документации, поскольку эксплуатирующая организация уже имеет каталог возможных дефектов и пути их устранения.

Выводы

Видится огромный потенциал представленного подхода, позволяющего накапливать и эффективно обрабатывать данные, возникающие из слияния таких технологий как Big Data и BIM, с последующей генерацией каталогов возможных проектных решений (с оценкой их эффективности), что в конечном итоге, приведет к сокращению сроков и затрат на проектирование и эксплуатацию строительных объектов.

Список литературы

1. Гинзбург А.В., Л.А. Шилов, Л.А. Шилова Современное состояние развития систем автоматизированного проектирования в Российской Федерации – Тамбов: Изд-во: Перспективы науки, 2018, 105-112
2. Гинзбург А.В., Л.А. Шилов, Л.А. Шилова Современные стандарты информационного моделирования в строительстве – М.: Изд-во: НО, 2017, с.16-20

АННОТАЦИИ
ABSTRACTS

А.А. Цапаев, В.В. Бронская, Т.В. Игнашина, П.П. Суханов
НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ
УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ВОДОЙ

Ключевые слова: нейронная сеть, коэффициент массоотдачи, математическое моделирование, процессы химической технологии.

Разработана искусственная нейронная сеть для прогнозирования коэффициентов массоотдачи в жидкой и газовой фазах для процесса абсорбции газа (CO_2) из воздуха абсорбентом - водой. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования обширного класса процессов химической технологии с возможностью формализации расчётных процедур.

В.Н. Кудашов, Е.Г. Селина
УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ
С ПОТЕРЯМИ И УСИЛЕНИЕМ

Ключевые слова: оптический резонатор, устойчивость, ABCD-преобразование, ABCD-матрица.

Рассмотрены комплексные ABCD-преобразования для плоских оптических кольцевых резонаторов с потерями и усилением и условия устойчивости таких резонаторов. Предложен простой метод исследования устойчивости оптических резонаторов. Рассмотрена связь устойчивости резонаторов с матрицами монодромии.

В.Ш. Ройтенберг
О ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛАХ УРАВНЕНИЙ, БЛИЗКИХ К
УРАВНЕНИЮ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

Ключевые слова: дифференциальное уравнение второго порядка, малые параметры, фазовое пространство, предельный цикл. Рассматривается дифференциальное уравнение второго порядка, зависящее от двух малых параметров, совпадающее при нулевых значениях параметров с уравнением гармонического осциллятора, а при нулевом значении только первого параметра являющееся консервативным. Исследуется случай, когда при изменении параметров из замкнутой траектории уравнения гармонического осциллятора может родиться двойной цикл и два грубых цикла.

Ф.Д. Байрамов, Б.Ф. Байрамов, А.Р. Фардеев
АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ
ВРАЩЕНИЯ ДИСКОВОЙ ПИЛЫ В ОТРЕЗНЫХ СТАНКАХ

Ключевые слова: гидропривод для вращения дисковой пилы станка, автоматический регулятор расхода рабочей жидкости, математическое моделирование динамики, устойчивость работы.

Разработана принципиальная схема гидропривода с автоматическим регулятором скорости вращения дисковой пилы отрезного станка. Регулирование скорости осуществляется за счёт изменения частоты вращения вала электродвигателя насоса. Проведено математическое моделирование динамики и получены условия устойчивости работы гидропривода.

А.П. Буйносов, И.С. Цихалевский
РЕМОНТ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЛУЖИВАНИЕ ПРИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВА

Ключевые слова: локомотив, НИОД, эксплуатация, обработка, ремонт, обслуживание, деталь, долговечность.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке влияния применения состава НИОД на повышение ресурса деталей и узлов локомотивов в период их эксплуатации. Выполнен сравнительный анализ долговечности бандажей колесных пар обработанных и необработанных составом НИОД после проведения широкомасштабного эксперимента в шести эксплуатационных локомотивных депо на четырех сериях локомотивов.

A.A. Tsapaev, V.V. Bronskay, T.V. Ignashina, P.P. Sukhanov
NEURAL NETWORK MODEL OF THE ABSORPTION
PROCESS OF CARBON DIOXIDE WITH WATER

Keywords: neural network, mass transfer coefficient, mathematical modeling, chemical technology processes.

An artificial neural network has been developed for predicting the mass transfer coefficients in the liquid and gas phases for the process of gas absorption (CO_2) from air by absorbent - water. The obtained results can be used to simulate a broad class of chemical technology processes with the possibility of formalization of calculation procedures.

V.N. Kudashov, E.G. Selina
PLANE OPTICAL RESONATORS STABILITY WITH
LOSSES AND AMPLIFICATION

Keywords: optical resonator, stability, ABCD-transformation, ABCD-matrix.

The article considers complex ABCD-transformations for plane optical ring resonators with losses and amplification and stability conditions for these resonators. Authors propose simple method to research stability of optical resonators and show relation between resonators stability and monodromy matrix. Examples of stable and unstable resonators are provided.

V.Sh. Roitenberg
ON LIMIT CYCLES OF EQUATIONS CLOSE TO THE
EQUATION OF THE HARMONIC OSCILLATOR

Keywords: differential equation of the second order, small parameters, phase space, limit cycle.

We consider a second-order differential equation that depends on two small parameters, coincides for zero values of the parameters with the harmonic oscillator equation, and for a zero value of only the first parameter is a conservative equation. The case is considered when a double cycle and two rough cycles can be born from the closed trajectory of the harmonic oscillator equation.

F.D. Bairamov, B.F. Bairamov, A.R. Fardeev
AUTOMATIC REGULATION OF ROTATION SPEED OF
THE CIRCULAR SAW IN CUTTING MACHINES

Keywords: hydraulic drive for rotating the circular saw of the machine, automatic flow regulator of the working fluid, mathematical modeling of the dynamics, work stability.

The principal scheme of the hydraulic drive with automatic rotation speed regulator of circular saw of the cutting machine is developed. Speed regulation is carried by changing the rotation frequency of electric engine's shaft of the pump. Mathematical modeling of the dynamics is done and conditions of hydraulic drive's stability are obtained.

A.P. Buinosov, I.S. Tsikhalevsky
REPAIR AND MAINTENANCE DURING OPERATION OF
THE LOCOMOTIVE

Keywords: locomotive, NIOD, operation, processing, repair, maintenance, parts, durability.

The article presents the results of theoretical and experimental studies to assess the impact of the use of NIOD on improving the life of parts and components of locomotives during their operation. A comparative analysis of the durability of wheelset bandages treated and untreated by the composition of NIOD after a large-scale experiment in six operational locomotive depots on four series of locomotives.

**А.А. Владимиров, А.Н. Афонин, А.В. Макаров
ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ
МИКРОНЕРОВНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ
ВИБРАЦИОННОМ ТОЧЕНИИ**

Ключевые слова: вибрационное точение, амплитуда колебаний, частота колебаний, микронеровности поверхности, шероховатость поверхности.

В работе представлена схема колебаний режущего инструмента при вибрационном точении. Приведены результаты моделирования микронеровности поверхности при вибрационном точении. Представлены фотографии поверхностей, полученных при обработке вибрационным точением. Указаны факторы, оказывающие влияние на формирование микронеровностей поверхности.

**А.В. Жданов, П.В. Фадеев
ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В
РЕЗЬБОВЫХ СОПРЯЖЕНИЯХ ПЛАНЕТАРНЫХ РВМ**

Ключевые слова: роликовинтовой механизм (РВМ), контактные напряжения, площадка контакта.

В статье проводится анализ контактного взаимодействия в резьбовых сопряжениях роликовинтовых механизмов. На основе метода конечных элементов проанализированы форма и размеры площадки контакта в сопряжении винт-ролик в зависимости от соотношений углов подъема резьб, определены величины смещения пятна контакта по витку, проведено уточнение контактных напряжений в пятне.

**А.Б. Иванченко, А.В. Жданов
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ НА СТАТИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ
СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННОГО ЛАЗЕРНОЙ
СВАРКОЙ**

Ключевые слова: лазерная сварка (ЛС), остаточные сварочные напряжения (ОСН), метод конечных элементов (КЭ).

В статье описана методика для определения остаточных сварочных напряжений в условиях лазерной сварки. Проведена оценка их влияния на статическую прочность сварного соединения. Результаты экспериментальных исследований подтвердили высокую эффективность предложенных моделей.

**В.С. Наговицын, А.П. Буйносов, А.Р. Динисламов
ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВИНТОВЫХ
РЕССОР ДЛЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО
СОСТАВА**

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, подвижной состав, рессора, винт, применение, обоснование, выбор.

В статье рассматривается методика расчета параметров цилиндрических винтовых рессор для разных ступеней рессорного подвешивания железнодорожного подвижного состава. Приведены результаты и обоснован выбор винтовых рессор для электровоза 2ЭС6.

**А.Р. Фардеев, Ф.Д. Байрамов, А.А. Фардеев, Б.Ф. Байрамов
ВОЗМОЖНОСТЬ ВКЛЮЧЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА В
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ КОВКИ ИЛИ ГОРЯЧЕЙ
ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВОК**

Ключевые слова: технологический процесс, манипулятор, захватное устройство, продольный размер, поперечный размер.
В статье проведен анализ существующих технологических процессов ковки и горячей штамповки заготовок на примере процесса штамповки заготовки шестерни заднего моста автомобиля на машиностроительном предприятии. Предложено автоматизировать некоторые этапы указанного технологического процесса при помощи манипулятора. Выбор захватного устройства произведен в зависимости от формы и температуры заготовки. Выбор продольных и поперечных размеров элементов модулей подвижности произведен в зависимости от величины необходимого хода по каждой степени подвижности манипулятора и величин внешних нагрузок.

**A.A. Vladimirov, A.N. Afonin, A.V. Makarov
FEATURES OF THE MECHANISM OF FORMING THE
SURFACE MICRONEROSITY DURING VIBRATION
SWITCHING**

Keywords: vibratory turning, amplitude of oscillation, oscillation frequency, microroughness of the surface, surface roughness.

The paper presents the oscillation scheme of the cutting tool during vibration turning. The results of modeling the surface irregularity during vibration turning are given. Presents photographs of surfaces obtained by processing vibration turning. The factors affecting the formation of surface asperities are indicated.

**A.V. Zhdanov, P.V. Fadeev
FEATURES OF CONTACT INTERACTION IN THREADED
MATING PLANETARY RSM**

Keywords: roller screw mechanism (RSM), contact stress, contact area.

The article analyzes the contact interaction in the threaded interfaces of roller screw mechanisms. On the basis of the finite element method, the shape and size of the contact area in the screw-roller interface are analyzed depending on the ratio of the lifting angles of the threads, the values of the displacement of the contact spot along the coil are determined, the contact stresses in the spot are specified.

**A.B. Ivanchenko, A.V. Zhdanov
EVALUATION OF THE EFFECT OF RESIDUAL
WELDING STRESSES ON THE STATIC STRENGTH OF A
WELDED CONNECTION PERFORMED BY LASER
WELDING**

Keywords: laser welding, residual welding stresses, finite element method.

The article describes a method for determining the residual welding stresses in laser welding conditions. The assessment of their influence on the static strength of the welded joint is carried out. The results of experimental studies have confirmed the high efficiency of the proposed models.

**V.S. Nagovitsyn, A.P. Buiunov, A.R. Dinislamov
SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE USE OF
HELICAL SPRINGS FOR RAILWAY ROLLING STOCK**

Keywords: railway transport, rolling stock, spring, screw, application, justification, choice.

The article deals with the method of calculating the parameters of cylindrical screw springs for different stages of spring suspension of railway rolling stock. The results are presented and the choice of screw springs for electric locomotive 2ES6 is justified.

**A.R. Fardeyev, F.D. Bairamov, A.A. Fardeyev, B.F. Bairamov
THE POSSIBILITY OF THE MANIPULATOR INCLUSION
INTO THE TECHNOLOGICAL PROCESSES OF
PREPARATIONS FORGING OR HOT STAMPING**

Keywords: technological process, manipulator, gripping device, longitudinal size, transverse size.

The article analyzes the existing technological processes of blanks forging and hot stamping on the example of stamping the billet gear of the rear axle of a car at a machine-building enterprise. It is proposed to automate some stages of the specified technological process with the help of a manipulator. The choice of gripping device is made depending on the shape and temperature of the workpiece. The choice of the longitudinal and transverse dimensions of the mobility modules elements is made depending on the required stroke magnitude for each degree of a manipulator mobility and the values of external loads.

З.Р. Фасхиева, Р.М. Хусаинов, С.М. Петров, Г.К. Давлетшина,
Ф.Ф. Насыбуллин, Е.В. Стихнин
ОБОСНОВАНИЕ РЕНОВАЦИИ ТЯЖЕЛОГО
МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ключевые слова: геометрическая точность, модернизация, компенсация погрешностей.

Статья рассматривает вопросы целесообразности модернизации, важные задачи и мероприятия капитального ремонта крупногабаритных металлорежущих станков.

Д.А. Фомин
МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИТУАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
НЕФТЕПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ключевые слова: нефтегазопромысловое оборудование, деревья отказов, генетические алгоритмы, экспертная система, ситуационный анализ, управление ситуациями.

В статье рассматривается подход для создания аналитического ядра экспертной системы ситуационного анализа при эксплуатации нефтепромыслового оборудования. Приводится оптимизационная постановка задачи определения набора мер для обеспечения безопасности и безаварийности при эксплуатации оборудования. Предлагается подход решения задачи определения набора мер на основе эволюционного генетического алгоритма.

Н.Н. Беспалов, В.Г. Мясин
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В КОРПУСЕ TO-220
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИАТОРА

Ключевые слова: тепловой расчёт, тепловая модель, IGBT, тепловое сопротивление, рассеиваемая мощность.

В статье рассматриваются тепловые процессы для полупроводниковых приборов, выполненных в корпусе TO-220. Исследованы случаи постоянной, нарастающей и переменной мощности, выделяемой в полупроводниковом кристалле прибора. Полученные результаты могут быть использованы при тепловых расчётах электрических преобразователей.

О.Ш. Даутов, М.С. Аль-Абади
ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ РАБОТЫ ЦЕЛЕВОЙ
АНТЕННЫ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СФЕРЕ ПОД СЛОЕМ
ПЛАЗМЫ

Ключевые слова: диаграмма направленности; сферическая целевая антенна; плотность плазмы; толщина слоя; длина волны; интегро-функциональное уравнение.

Исследовано влияние на работу целевой антенны на металлической сфере под слоем плазмы длины волны, толщины плазменного слоя и плотности электронной плазмы. На основе метода интегро-функционального уравнения реализована возможность скалярного представления поля кольцевой целевой синфазной антенны на металлической сфере. Численно с помощью программы в среде MATHCAD проанализировано влияние этих факторов на работу антенны. Обнаружено, что с помощью подбора подходящей плотности электронной плазмы, толщины ее слоя, электрических размеров сферы и кольцевой щели удастся получить удовлетворительную диаграмму направленности.

И.В. Нелин, М.К. Седанкин, С.Г. Веснин, В.А. Скуратов,
М.В. Мартянова
РАЗРАБОТКА МЕДИЦИНСКОЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ
ТЕКСТИЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ключевые слова: микроволновая радиотермометрия, печатная антенна, радиояркостная температура, медицинская робототехника.

Данная работа посвящена разработке печатной антенны для медицинской робототехники. Основная цель работы заключается в разработке антенны из материалов, применяемых в текстильной промышленности. Спроектирована печатная текстильная антенна на основе математического моделирования и экспериментальных

Z.R. Faskhieva, R.M. Khusainov, S.M. Petrov,
G.K. Davletshina, F.F. Nasybullin, E.V. Stikhnin
JUSTIFICATION OF RENOVATION OF HEAVY METALL-
CUTTING EQUIPMENT

Keywords: geometric accuracy, modernization, error compensation.

The article considers the issues of expediency of modernization, important tasks and measures of major repairs of large-size metal-cutting machines.

D.A. Fomin
DEVELOPMENT OF ANALYTICAL APPROACH FOR AN
EXPERT SYSTEM FOR OPERATING OILFIELD
EQUIPMENT SITUATIONS ANALYSIS

Keywords: oil and gas field equipment, failure trees, genetic algorithms, expert system, situational analysis, situation management.

The article discusses an approach for creating an analytical core of an expert system for situational analysis in the operation of oilfield equipment. An optimization formulation of the problem of determining the set of measures to ensure safety and trouble-free operation of the equipment is given. An approach is proposed for solving the problem of determining a set of measures based on an evolutionary genetic algorithm.

N.N. Bepalov, V.G. Myasin
THE RESEARCH OF THERMAL PROCESSES OF
SEMICONDUCTOR DEVICES IN TO-220 PACKAGE
WITH HEATSINK

Keywords: thermal calculation, thermal model, IGBT, thermal resistance, power dissipation.

In article thermal processes for the semiconductor devices executed in the TO-220 case are considered. Cases of the constant and the variable power allocated in a semiconductor crystal of the device are investigated. The received results can be used at thermal calculations of electric converters.

O.Sh. Dautov, M.S. Al-Abadi
OPTIMUM CONDITIONS FOR A SLOT ANTENNA
OPERATION ON A METAL SPHERE UNDER A LAYER
OF PLASMA

Keywords: directivity pattern; spherical slotted antenna; plasma density; layer thickness; wavelength; Integra-functional equation.

The effect on the operation of a slot antenna on a metal sphere under a plasma layer of a wavelength, plasma layer thickness and electron plasma density is investigated. On the basis of the Integra-functional equation method, the possibility of a scalar representation of the field of an annular slot common-mode antenna on a metal sphere is realized. The influence of these factors on the operation of the antenna was analyzed numerically using the program in the MATHCAD environment. It was found that by selecting an appropriate density of the electron plasma, the thickness of its layer, the electrical dimensions of the sphere and the annular slot, it is possible to obtain a satisfactory radiation pattern.

I.V. Nelin, M.K. Sedankin, S.G. Vesnin, V.A. Skuratov,
M.V. Martyanova
DEVELOPMENT OF MEDICAL ANTENNA BASED ON
TEXTILE TECHNOLOGIES

Keywords: microwave radiometry, printed antenna, brightness temperature, medical robotics.

This work is devoted to the development of a printing antenna for medical robotics. The main objective of the work is to develop an antenna of materials used in the textile industry. Designed printed textile antenna based on mathematical modeling and experimental studies. The antenna has been tested on various phantoms and biological tissues. Research results showed that the antenna has acceptable characteristics

исследований. Антенна протестирована на различных фантомах и биологических тканях. Результаты исследований показали, что антенна имеет приемлемые характеристики для использования в различных направлениях медицины.

Ф.Ф. Рамазанов, И.Ф. Рамазанов
ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО
АНЕМОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ С ВЫСОКОЙ
СТЕПЕНЬЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, светорассеивающие частицы, измерительный объём, алгоритм обнаружения-оценивания, поле скоростей.

В статье рассматривается применение лазерного доплеровского анемометра для измерения параметров потоков с высокой степенью турбулентности в энергетических установках. Установлено, что бесконтактный метод лазерной доплеровской анемометрии позволяет получить достоверную картину распределения поля скоростей в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

А.Е. Аблаева, В.В. Слепцов, И.В. Таржанов, С.В. Шаныгин
АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ЕДИНЫМ
ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

Ключевые слова: электропривод, единый источник силового питания, переходной процесс.

В работе представлены результаты исследования влияния источника силового питания ограниченной мощности на показатели качества переходных процессов электроприводов технологических машин.

Д.А. Безуглов, В.В. Воронин, С.Е. Мищенко, В.И. Юхнов
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ
КОНТУРОВ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ

Ключевые слова: эффективность алгоритма выделения контуров, сплайн-аппроксимация, модуль градиента яркости.

В работе рассмотрена эффективность алгоритма пространственной фильтрации телевизионных изображений, искаженных импульсными шумами с использованием сплайн-аппроксимации. Проведено математическое моделирование предложенного подхода и показаны его преимущества. Приведено аналитическое выражение для оценки вычислительных затрат при реализации данного алгоритма по сравнению с методом вейвлет-дифференцирования, иллюстрирующее вычислительную эффективность предложенного алгоритма

П.Н. Гаряев
БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Ключевые слова: большие данные, Big Data, информационное моделирование, BIM, облачные вычисления.

В статье представлены результаты анализа применения современных информационных технологий при обработке больших объемов данных с целью извлечения полезной информации для строительной отрасли. Рассмотрены текущее состояние и будущий потенциал таких технологий в предметных областях строительной отрасли.

С.В. Ерохин, Е.М. Гусакова
РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ДРОБНЫХ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

Ключевые слова: ползучесть, вязкоупругость, производная дробного порядка, разностная схема.

В работе построены разностные схемы для дифференциальных уравнений с производной дробного порядка. Подобные уравнения возникают при моделировании ползучести для вязкоупругих материалов. Показана устойчивость и сходимость численного метода.

for use in various areas of medicine.

F.F. Ramazanov, I.F. Ramazanov
THE USE OF A LASER DOPPLER ANEMOMETER FOR
MEASURING FLOW PARAMETERS WITH A HIGH
DEGREE OF TURBULENCE

Keywords: laser Doppler anemometer, light scattering particles, measurement volume, detection-estimation algorithm, velocity field.

The article discusses the use of a laser Doppler anemometer for measuring flow parameters with a high degree of turbulence in power plants. It is established that the contactless method of laser Doppler anemometry allows to obtain a reliable picture of the distribution of the velocity field in the cylinder of an internal combustion engine.

A.E. Ablaeva, V.V. Sleptsov, I.V. Tarzhanov, S.V. Shanygin
ANALYSIS OF THE ELECTRIC DRIVES SYSTEM WITH
A UNIFORM POWER SUPPLY

Keywords: electric drive, uniform power supply, transient process.

The paper presents the results of a study of the influence of a power source of limited power on the quality indicators of transients of electric drives of technological machines.

D.A. Bezuglov, V.V. Voronin, S.E. Mishchenko, V.I. Yuhnov
ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ALGORITHM OF
ALLOCATION OF CONTOURS OF TELEVISION IMAGES
USING A SPLINE-APPROXIMATION

Keywords: efficiency of the algorithm of contouring, spline approximation, the magnitude of the gradient of brightness.

The paper considers the efficiency of the algorithm of spatial filtering of television images distorted by pulse noise using spline approximation. Mathematical modeling of the proposed approach is carried out and its advantages are shown. An analytical expression for the estimation of computational costs in the implementation of this algorithm in comparison with the method of wavelet differentiation, illustrating the computational efficiency of the proposed algorithm, is given

P.N. Garyaev
BIG DATA IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY
Keywords: Big Data, information modeling, BIM, cloud computing.

The article presents the results of the analysis of the application of modern information technologies in the processing of large amounts of data in order to extract useful information for the construction industry. The current state and future potential of such technologies in the subject areas of the construction industry are considered.

S.V. Erokhin, E.M. Gusakova
DIFFERENCE SCHEMES FOR CREEP FRACTIONAL
DIFFERENTIAL EQUATIONS

Keywords: creep, viscoelasticity, fractional order derivative, difference scheme.

In this paper, difference schemes for differential equations with a derivative of fractional order are constructed. Similar equations arise when modeling the creep of viscoelastic materials. The stability and convergence of the numerical method is shown.

Е.А. Серова, Л.А. Шилова

**РИСКИ ПРИМЕНЕНИЯ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ
ПРОЕКТИРОВАНИИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

Ключевые слова: BIM-технологии, риск, факторы риска, объекты транспортной инфраструктуры, ГИС-модель, имитационное моделирование.

В настоящей статье рассмотрена проблематика применения BIM-технологий при проектировании объектов транспортной инфраструктуры, связанная с необходимостью учета ГИС-форматов и реализации имитационного моделирования транспортной ситуации. В процессе исследования выявлены рискообразующие факторы, определены виды рисков применения BIM-технологий при проектировании объектов транспортной инфраструктуры.

Л.А. Шилов, Л.А. Шилова

**ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ BIM-
ТЕХНОЛОГИЙ**

Ключевые слова: строительный объект, жизненный цикл, Big Data, BIM, каталог решений.

В работе описывается подход к управлению жизненным циклом строительного объекта, основанный на анализе концепции внедрения информационной модели, содержащей различные состояния строительного объекта.

E.A. Serova, L.A. Shilova

**RISKS OF USING BIM TECHNOLOGIES IN THE DESIGN
OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES**

Keywords: BIM-technologies, risk, risk factors, transport infrastructure objects, GIS-model, simulation modeling.

This article discusses the problems of using BIM-technologies in the design of transport infrastructure facilities according to the need of using GIS-formats and the implementation of transport situation simulation modeling. The risk-forming factors were identified and the types of risks associated with the use of BIM-technologies in the design of transport infrastructure were determined during this research work.

L.A. Shilov, L.A. Shilova

**COMPLEX APPROACH FOR MANAGING THE
BUILDING OBJECT'S LIFE CYCLE BASED ON BIM-
TECHNOLOGIES**

Keywords: building object, life cycle, Big Data, BIM, solution catalog.

The paper describes an approach to managing the life cycle of a building object, based on an analysis of the concept of implementing an information model containing various states of a building object.

Публичный лицензионный договор-оферта о правах на статью

Редакция журнала «Научно-технический вестник Поволжья» предлагает Вам присылать свои статьи для публикации на страницах журнала, а также на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ). Предоставление Автором своего произведения является полным и безоговорочным акцептом, т.е. данный договор считается заключенным с соблюдением письменной формы. Присылая для публикации произведение, Автор также предоставляет Редакции журнала права на использование произведения и гарантирует, что он обладает достаточным объемом прав на передаваемое произведение. Также Автор предоставляет редакции журнала право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему Договору права третьим лицам без выплаты Автору вознаграждения. Все авторские права регулируются в соответствии с действующим законодательством России.

Договор публичной оферты по обработке персональных данных

В процессе осуществления выпуска журнала "Научно-технический вестник Поволжья", ООО "Научно-технический вестник Поволжья" и ООО "Рашин Сайнс" осуществляется обработка персональных данных, предоставленных авторами статей в рамках сообщения своих регистрационных данных для осуществления публикации в журнале (имя, фамилия, отчество, адрес автора, контактный телефон и e-mail приводятся в регистрационной форме, заполняемой авторами при отправке статьи в журнал). Обработка осуществляется редакцией журнала для целей надлежащей отправки журнала автору и возможности связи с автором лиц, заинтересованных в результатах труда автора статьи. Под обработкой персональных данных в контексте настоящего согласия понимаются действия редакции по сбору, систематизации, накоплению, хранению, использованию, распространению, уничтожению персональных данных, а также действия по их дальнейшей обработке с помощью автоматизированных систем управления базами данных, и иных программных средств, используемых редакцией журнала. Настоящее согласие автора на обработку персональных данных является бессрочным и может быть отозвано в любой момент путем отказа автора от получения журнала и дальнейшей обработки его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ

№2 2019

Направления:

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

**05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И
МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

**05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

www.ntvp.ru

Свидетельство № ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Подписано в печать 18.02.2019 Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

7,6 усл.печ.л. 8,1 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 1870.

Учредитель: ООО «Научно-технический вестник Поволжья»

420021, Республика Татарстан, Казань,

ул. З.Султана, д.17а, оф. 19

Адрес редакции, издателя и типографии совпадают с адресом учредителя

Цена свободная.

© Научно-технический вестник Поволжья

тел.(843) 216-30-35

Отпечатано с готового оригинал-макета

ООО «Научно-технический вестник Поволжья»