

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№2 2018

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

2018

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №2 2018г. – Казань:
Научно-технический вестник Поволжья, 2018. – 100 с.

ISSN 2079-5920

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2

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.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, 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ**01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА**

<i>Н.С. Блохина, А.Г. Мясников, Т.Н. Титова, В.А. Харитонов, Н.М. Чиганова, К.С. Шавалиева</i> АСИМПТОТИКА ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ	7
<i>В.В. Дружинин</i> СТРУКТУРА ЧИСЕЛ ФИБОНАЧЧИ	14
<i>В.Ш. Ройтенберг</i> О БИФУРКАЦИЯХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ КУСОЧНО-ГЛАДКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	17

05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>А.П. Буйносов</i> ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ТЕПЛОВЗОВ В ДЕПО СУРГУТ	21
<i>О.А. Кулаков</i> ОБОСНОВАНИЕ НОВОЙ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ В ЭКСПЛУАТАЦИИ	25
<i>Ю.И. Лесникова, О.Ю. Сметанников, А.Н. Труфанов</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕРМОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО В ПОЛИМЕРНОМ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩЕМ ПОКРЫТИИ	28
<i>В.П. Новоселов, М.Д. Лукашук, К.Н. Пестов</i> ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВОГО МЕХАНИЗМА ПРИВОДА СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ	32
<i>И.С. Цихалевский, А.П. Буйносов</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НЕПОДРЕССОРЕННОЙ МАССЫ, ПРИХОДЯЩЕЙСЯ НА ОДНО КОЛЕСО ЭЛЕКТРОВЗОВ ПРИ НАЕЗДЕ НА НЕРОВНОСТЬ ПУТИ	35

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

<i>В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.В. Таланов</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБАСТНОЙ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ТРЕХУРОВНЕВОГО ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ 15 КВТ	39
<i>А.Г. Шляхова, А.Т. Шляхов</i> ЭКСТРЕМУМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ	42

05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>В.Л. Акимов, А.С. Дюлина, М.В. Таланов</i> РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ	46
<i>И.А. Акимов, В.А. Урбан</i> ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ ТЕПЛООБМЕНА НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ	50
<i>В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.В. Таланов</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ И С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИ ОДНОГО ЦИКЛА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ	54
<i>Е.И. Васильева, В.О. Каледин</i> АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СКОРОСТЕЙ НА РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В КАВЕРНЕ	57

И.Н. Голяшкова, В.В. Андреев ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КРИВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	60
В.М. Градов, И.А. Желаяев, С.С. Коробков МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ ИЗЛУЧЕНИЯ С КСЕНОНОВЫМ НАПОЛНЕНИЕМ	63
В.М. Градов, И.А. Желаяев, С.С. Коробков МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ОБОЛОЧЕК ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ	67
И.Р. Давлетишин, Л.А. Симонова, В.В. Абрамова ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ НАДСТРОЙКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ	70
А.А. Емельянов, В.В. Малышев, Нгуен Виет Хоай Нам, А.В. Старков МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЗЗ В ЧАСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ	74
А.Н. Заикин, Е.Г. Рыжикова АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ	80
В.М. Коржук, Патрик Бонковски, И.М. Шилов ИДЕНТИФИКАЦИЯ АТАК НА БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ СЕТИ	83
В.А. Соловьев, Н.Е. Дерюжкова, Чжоу Аунг Хтет, В.В. Тетерин ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХТОЧЕЧНОГО УЗЛА ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТИПА	86
Т.Е. Фазлутдинова, И.А. Акимов, А.И. Акимов ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ	91
АННОТАЦИИ	94

THE RELEASE MAINTENANCE

01.01.00 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — MATHEMATICS

<i>N.S. Blokhina, A.G. Myasnikov, T.N. Titova, V.A. Kharitonov, N.M. Chiganova, K.S. Shavaliyeva</i> ASYMPTOTICS OF THE INVERSE FILTRATION PROBLEM	7
<i>V.V. Druzhinin</i> THE STRUCTURE OF THE FIBONACCI NUMBERS	14
<i>V.Sh. Roitenberg</i> ON BIFURCATIONS OF LIMIT CYCLES OF A PIECEWISE SMOOTH DYNAMICAL SYSTEM	17

05.02.00 — TECHNICAL SCIENCES — MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

<i>A.P. Buinosov</i> INCREASE OF DURABILITY OF BANDAGES OF WHEEL PAIRS OF LOCOMOTIVES IN THE DEPOT SURGUT	21
<i>O.A. Kulakov</i> THE SUBSTANTIATION OF THE NEW DIAGNOSTIC METHODOLOGY SUPPORT BEARINGS OF THE KAMAZ	25
<i>Y.I. Lesnikova, O.Y. Smetannikov, A.N. Trufanov</i> NUMERICAL MODELING OF CONTACT THERMOPOWER INFLUENCE TO THE OPTIC FIBER IN THE POLYMER PROTECTIVE-STRENGTHENING COATING	28
<i>V.P. Novoselov, M.D. Lukashuk, K.N. Pestov</i> DYNAMIC ANALYSIS OF A CYCLIC MECHANISM DESIGNED FOR DRIVES OF TUBE COLD-ROLLING MILLS	32
<i>I.S. Tsikhalevsky, A.P. Buinosov</i> DETERMINING ACCELERATION OF MOVEMENT OF THE UNSPRUNG MASS PER WHEEL OF THE LOCOMOTIVE AT ARRIVAL ON ROUGHNESS OF THE WAY	35

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

<i>V.Y. Artamonov, N.V. Dubov, M.V. Talanov</i> DESIGN OF ROBUST POWER CIRCUIT OF THREE-LEVEL THREE-PHASE INVERTER FOR 15 kW INDUCTION MOTOR	39
<i>A.G. Shlyakhova, A.T. Shlyakhov</i> EXTREMUM OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES FROM THE LEVEL OF DOPING IN GALLIUM ARSENIDE	42

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

<i>V.L. Akimov, A.S. Dyulina, M.V. Talanov</i> DEVELOPMENT OF VECTOR CONTROL SYSTEM OF FREQUENCY CONVERTER IN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF PUMPING UNIT	46
<i>I.A. Akimov, V.A. Urban</i> RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATION FORMULAS OF HEAT TRANSFER AT THE FIRST STAGE OF PRODUCTION OF MULTILAYER STRUCTURES OF SPHERICAL SHAPE WITH A POLYMERIZATION	50
<i>V.Y. Artamonov, N.V. Dubov, M.V. Talanov</i> COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER FACTOR CORRECTORS WITH PROPORTIONAL REGULATOR AND WITH ONE CYCLE CONTROL OF FREQUENCY CONVERTER OF PUMPING UNIT	54
<i>E.I. Vasileva, V.O. Kaledin</i> APPROBATION OF THE METHODS OF CALCULATION OF SPEEDS ON THE DECISION OF THE PROBLEM OF THE LIQUID CURRENT FLOW IN CAVERNA	57
<i>I.N. Golyashkova, V.V. Andreev</i> FORECASTING OF HYDRAULIC RESISTANCE CURVES ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA GENERALIZATION	60
<i>V.M. Gradov, I.A. Zhelayev, S.S. Korobkov</i> MATHEMATICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PROCESSES IN DISCHARGE PULSE PERIODIC SOURCES OF RADIATION WITH FILLING OF XENON	63

V.M. Gradov, I.A. Zhelayev, S.S. Korobkov MODELING OF THERMAL REGIME OF SHELLS OF GAS DISCHARGE RADIATION SOURCES IN PULSED-PERIODIC OPERATION MODES	67
I.R. Davletshin, L.A. Simonova, V.V. Abramova INTELLIGENT MANAGEMENT SYSTEM SUPERSTRUCTURE AUTOMATIC LINE FOR THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS BASED ON MULTI-AGENT SYSTEMS	70
A.A. Emel'yanov, V.V. Malyshev, V.H.N. Nguyen, A.V. Starkov MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONING OF THE GROUND SEGMENT IN DISTRIBUTED REMOTE SENSING DATA PROCESSING	74
A.N. Zaikin, E.G. Ryzhikova ANALYSIS OF THE RESULTS OF COMPUTATIONAL EXPERIMENTS WITH THE NONPARAMETRIC	80
V.M. Korjuk, P.Bankovski, I.M. Shilov IDENTIFICATION OF ATTACKS ON WIRELESS SENSOR NETWORK ON THE BASIS OF ABNORMAL BEHAVIOUR ANALYSIS	83
V.A. Solovyov, N.E. Deryuzhkova, Kyaw Aung Htet, V.V. Teterin ELECTROMECHANICAL TYPE SIMULATION MODEL OF THREE-POINT-BEND FORMING PROCESS OF SHEET MATERIAL	86
T.E. Fazlutdinova, I.A. Akimov, A.I. Akimov RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS AND THERMO-ELASTIC STRESSES AND STRAINS IN THE PRODUCTION OF MULTILAYER STRUCTURES OF SPHERICAL SHAPE WITH A POLYMERIZATION	91
ABSTRACTS	94

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА (01.01.00)

01.01.02

Н.С. Блохина, А.Г. Мясников, Т.Н. Титова,
В.А. Харитонов, Н.М. Чиганова, К.С. Шавалиева

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
кафедра прикладной математики,
Москва, ShavaliyevaKS@mgsu.ru

АСИМПТОТИКА ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-7-13

Описание фильтрации суспензии в пористой среде необходимо при укреплении фундамента и создании водонепроницаемого слоя в нефтедобывающей промышленности, при очистке промышленных и сточных вод. Параметры, задающие математическую модель фильтрации и ее решение, определяются экспериментально. В работе решается обратная задача фильтрации – нахождение коэффициентов асимптотики по значениям концентраций взвешенных и осажденных частиц на входе и выходе фильтра. Приводится оценка погрешности метода.

Ключевые слова: задача фильтрации, суспензия, пористая среда, взвешенные и осажденные частицы, асимптотика, обратная задача.

Введение. Фильтрация суспензии в пористой среде является важной задачей подземной гидромеханики [1-5]. Суспензией называется жидкость, содержащая взвесь мельчайших твердых частиц. Пористая среда – это твердое тело с пустотами различных форм и размеров. Пустоты образуют поры – каналы, по которым жидкость, впрыскиваемая в твердое тело с одной стороны, просачивается через него и вытекает с противоположной стороны. При этом взвешенные частицы частично проходят через твердое тело вместе с жидкостью, а частично задерживаются в твердом теле – фильтре и образуют осадок. Математическая модель фильтрации суспензии строится в предположении, что беспрепятственное прохождение и захват частиц фильтром определяется исключительно геометрическими соотношениями размеров частиц и пор [6-10]: если размер поры больше размера частицы, частица проходит через пору; если размер поры меньше размера частицы, частица застревает на входе поры. Будем рассматривать взвесь частиц одинаковых размеров, проходящую через однородный фильтр длины 1 постоянного поперечного сечения. На вход фильтра впрыскивается суспензия с постоянной концентрацией K взвешенных частиц. В [11-15] построены асимптотические решения задачи фильтрации суспензии, позволяющие определить концентрации взвешенных и осажденных частиц на входе и выходе фильтра. Сравнение асимптотики с заданными концентрациями частиц при различных значениях K позволяет решить обратную задачу фильтрации – нахождение параметров математической модели.

Система уравнений фильтрации. Концентрации взвешенных частиц $C(x, t)$ и осажденных частиц $S(x, t)$ удовлетворяют квазилинейной системе дифференциальных уравнений первого порядка [15, 16]

$$\frac{\partial}{\partial t} \{s(S)C + S\} + \frac{\partial}{\partial x} \{f(S)C\} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \Lambda(S)C. \quad (2)$$

Здесь $s(0) = g_0 > 0$, $f(0) = f_0 > 0$, $\Lambda(S) > 0$ при $S \geq 0$.

Задача (1), (2) рассматривается в области

$$\Omega = \{0 < x < 1, t > 0\}.$$

Краевые условия ставятся на входе фильтра

$$C(x, t)|_{x=0} = K, K > 0, \quad (3)$$

и в начальный момент времени

$$C(x, t)|_{t=0} = 0; \quad (4)$$

$$S(x, t)|_{t=0} = 0. \quad (5)$$

Задача (1), (2) имеет характеристику

$$t - ax = 0, a = \frac{g_0}{f_0}. \quad (6)$$

Фронт концентраций взвешенных и осажденных частиц движется в фильтре со скоростью $1/a$. При $t < ax$ концентрации взвешенных и осажденных частиц равны нулю; при $t > ax$ обе концентрации положительны [15, 17]. На характеристике (6) концентрация взвешенных частиц $C(x, t)$ разрывна; концентрация осажденных частиц $S(x, t)$ непрерывна и теряет гладкость.

В области

$$\tilde{\Omega} = \{0 < x < 1, t > ax\}$$

начальные условия (4), (5) можно заменить одним условием на характеристике [15]:

$$S(x, t)|_{t=ax} = 0. \quad (7)$$

Решение задачи (1) - (5) совпадает с решением задачи (1) - (3), (7) в $\tilde{\Omega}$.

Асимптотическое решение. Пусть функции $s(S)$, $f(S)$, $\Lambda(S)$ регулярны в окрестности точки $S = 0$. Тогда их можно разложить в ряды по степеням S :

$$s(S) = g_0 + g_1 S + g_2 S^2 + \dots, g_0 \neq 0; \quad (8)$$

$$f(S) = f_0 + f_1 S + f_2 S^2 + \dots, f_0 \neq 0; \quad (9)$$

$$\Lambda(S) = \lambda_0 + \lambda_1 S + \dots, \lambda_0 \neq 0. \quad (10)$$

Решение $S(x, t)$, $C(x, t)$ системы (1) - (3), (7) в области $\tilde{\Omega}$ строится в виде ряда по степеням $(t - ax)$ с коэффициентами, зависящими только от пространственной переменной x :

$$C^{(K)}(x, t) = c_0^{(K)}(x) + (t - ax)c_1^{(K)}(x) + \dots, \quad (11)$$

$$S^{(K)}(x, t) = (t - ax)v_0^{(K)}(x) + (t - ax)^2 v_1^{(K)}(x) + \dots \quad (12)$$

Обозначим

$$p_0 = e^{\frac{\lambda_0}{f_0}}, p_1 = af_1 - g_1, \quad (13)$$

$$p_2 = \lambda_0(g_2 - af_2), p_3 = \lambda_1 - \frac{2f_1\lambda_0}{f_0}.$$

Согласно [15] первые члены асимптотического разложения равны

$$c_0^{(K)} = \frac{1}{p_1 + (\frac{1}{K} - p_1)(p_0)^x}, \quad (14)$$

$$c_1^{(K)} = \left(p_2(1 - (p_0)^{2x}) + (\frac{1}{K} - p_1)p_3((p_0)^x - (p_0)^{2x}) \right) (c_0^{(K)})^3 \quad (15)$$

$$v_0^{(K)} = \lambda_0 c_0^{(K)}; \quad (16)$$

$$v_1^{(K)} = \frac{\lambda_0 \lambda_1}{2} (c_0^{(K)})^2 + \frac{\lambda_0 c_1^{(K)}}{2} \quad (17)$$

Определение параметров. Покажем, как вычислить параметры асимптотики (11), (12). Прежде всего найдем значение параметра a , замерив момент времени t_0 появления взвешенных частиц на выходе из фильтра. Поскольку фронт концентраций движется по фильтру со скоростью $\frac{1}{a}$, а приведенная длина фильтра $l = 1$, то $a = t_0$.

Обозначим через $C_{\text{exp}}^{(K)}(t)$ заданную концентрацию взвешенных частиц на выходе фильтра $x = 1$ в момент времени $t \geq t_0$. Пусть

$$S_0 = S^{(1)}(0, \tau), S_1 = S^{(1)}(1, \tau + t_0) \quad (18)$$

– концентрации осадка при $K = 1$ на входе фильтра в момент времени τ и на выходе фильтра в момент $\tau + t_0$. Данные значения должны удовлетворять следующим условиям.

1. Часть частиц суспензии застревает в фильтре, а другая часть проходит через фильтр:

$$0 < C_{\text{exp}}^{(K)}(t) < K. \quad (19)$$

2. Рассмотрим удельную площадь $s^{(K)}(x, t)$ поперечного сечения фильтра, приходящуюся на одну взвешенную частицу – величину, обратную концентрации. Будем предполагать, что в момент времени t_0 разность удельных площадей на входе и выходе фильтра

$$s^{(K)}(1, t_0) - s^{(K)}(0, t_0) = \frac{1}{C_{\text{exp}}^{(K)}(t_0)} - \frac{1}{K} \quad (20)$$

монотонно убывает при увеличении параметра K .

3. Концентрация взвешенных частиц суспензии на выходе фильтра возрастает со временем, поскольку количество свободных мелких пор фильтра, в которых застревают частицы, уменьшается:

$$C_{\text{exp}}^{(K)}(t + \Delta t) > C_{\text{exp}}^{(K)}(t) \text{ при } \Delta t > 0. \quad (21)$$

4. Концентрации взвешенных и осажденных частиц удовлетворяют соотношению

$$\frac{S_1}{S_0} > \left(C_{\text{exp}}^{(1)}(t_0)\right)^2 \quad (22)$$

Зафиксируем $k < 1$ и малое $\Delta t > 0$. Определим параметры (13) по значениям концентрации взвешенных частиц на выходе фильтра.

Теорема 1. В предположениях (19), (20) параметры (13) однозначно определяются по значениям

$$A_1 = C_{\text{exp}}^{(1)}(t_0), A_k = C_{\text{exp}}^{(k)}(t_0),$$

$$B_1 = C_{\text{exp}}^{(1)}(t_0 + \Delta t), B_k = C_{\text{exp}}^{(k)}(t_0 + \Delta t). \quad (23)$$

Доказательство. 1. Выразим параметры p_0, p_1 через A_1, A_k из (14) при $x = 1$. Имеем из (11) при $t = t_0$:

$$C^{(1)}(1, t_0) = c_0^{(1)}(1) = \frac{1}{p_1 + (1 - p_1)p_0} = A_1, \quad (24)$$

$$C^{(k)}(1, t_0) = c_0^{(k)}(1) = \frac{1}{p_1 + \left(\frac{1}{k} - p_1\right)p_0} = A_k \quad (25)$$

Находим p_0, p_1 из системы (24), (25)

$$p_0 = \frac{\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_k}}{1 - \frac{1}{k}}, \quad (26)$$

$$p_1 = \frac{\frac{1}{kA_1} - \frac{1}{A_k}}{\left(\frac{1}{A_1} - 1\right) - \left(\frac{1}{A_k} - \frac{1}{k}\right)}. \quad (27)$$

Из предположения (20) следует, что при $0 < k < 1$ знаменатель (27) отличен от нуля и параметр

$$p_0 = \frac{\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_k}}{1 - \frac{1}{k}} = \frac{\left(\frac{1}{A_1} - 1\right) - \left(\frac{1}{A_k} - \frac{1}{k}\right)}{1 - \frac{1}{k}} + 1 > 1. \quad (28)$$

Покажем, что знаменатель (14)

$$Z(x) = p_1 + \left(\frac{1}{k} - p_1\right)(p_0)^x$$

отличен от нуля при всех $x \geq 0$. Из (19), (20) имеем

$$\frac{1}{k} - p_1 = \frac{\left(1 - \frac{1}{k}\right)\left(\frac{1}{A_k} - \frac{1}{k}\right)}{\left(\frac{1}{A_1} - 1\right) - \left(\frac{1}{A_k} - \frac{1}{k}\right)} > 0.$$

Поскольку $Z(0) = \frac{1}{k}$ и

$$Z'(x) = \left(\frac{1}{k} - p_1\right)(p_0)^x \ln p_0 > 0,$$

то

$$Z(x) > \frac{1}{k} \text{ при } x \geq 0. \quad (29)$$

Следовательно, выражение (14) определено и однозначно задается параметрами (26), (27) при $x \geq 0$.

2. Найдем параметры p_2, p_3 из (11) при $t = t_0 + \Delta t$. Имеем

$$C^{(1)}(1, t_0 + \Delta t) = c_0^{(1)}(1) + c_1^{(1)}(1)\Delta t, \quad (30)$$

$$C^{(k)}(1, t_0 + \Delta t) = c_0^{(k)}(1) + c_1^{(k)}(1)\Delta t. \quad (31)$$

Подставляя (15) и используя (24), (25), получаем систему линейных алгебраических уравнений для определения констант p_2, p_3 :

$$B_1 = A_1 + (A_1)^3 \Delta t \cdot (p_2 + (1 - p_1)p_3 p_0 - (p_2 + (1 - p_1)p_3) p_0^2), \quad (32)$$

$$B_k = A_k + (A_k)^3 \Delta t \cdot \left(p_2 + (1 - p_1)p_3 p_0 - \left(p_2 + \left(\frac{1}{k} - p_1\right)p_3 \right) p_0^2 \right).$$

Преобразуем систему (32)

$$p_2(1 + p_0) + p_3(1 - p_1)p_0 = \frac{B_1 - A_1}{(1 - p_0)(A_1)^3 \Delta t}, \quad (33)$$

$$p_2(1 + p_0) + p_3\left(\frac{1}{k} - p_1\right)p_0 = \frac{B_k - A_k}{(1 - p_0)(A_k)^3 \Delta t}.$$

Определитель матрицы системы (33)

$$\begin{vmatrix} (1 + p_0) & (1 - p_1)p_0 \\ (1 + p_0) & \left(\frac{1}{k} - p_1\right)p_0 \end{vmatrix} = (1 + p_0)p_0\left(\frac{1}{k} - 1\right) \neq 0,$$

следовательно, параметры p_2, p_3 определяются единственным образом. Теорема 1 доказана.

Для нахождения параметров λ_0 , λ_1 необходимо сравнить асимптотику (12) с заданной концентрацией осадка S на передней и задней стенках фильтра. Выберем малое $\tau > 0$.

Теорема 2. В предположениях (19) - (22) параметры λ_0 , λ_1 однозначно определяются по значениям (18), (23).

Доказательство. Подставим (16), (17) в (12) при $t = \tau$, $x = 0$ и при $t = \tau + t_0$, $x = 1$:

$$S(0, \tau) = \lambda_0 \tau + \frac{\lambda_0 \lambda_1 \tau^2}{2}, \quad (34)$$

$$S(1, \tau + t_0) = \lambda_0 c_0^{(1)}(1) \tau + \frac{\lambda_0}{2} \left(\lambda_1 \left(c_0^{(1)}(1) \right)^2 + c_1^{(1)}(1) \right) \tau^2 \quad (35)$$

Из (18) получаем систему уравнений

$$\lambda_0 \tau \left(1 + \frac{\lambda_1 \tau}{2} \right) = S_0; \quad (36)$$

$$\lambda_0 \tau \left(c_0^{(1)}(1) + \left(\frac{\lambda_1}{2} \left(c_0^{(1)}(1) \right)^2 + \frac{c_1^{(1)}(1)}{2} \right) \tau \right) = S_1 \quad (37)$$

Из (23), (24), (30)

$$c_0^{(1)}(1) = A_1, \quad c_1^{(1)}(1) = \frac{B_1 - A_1}{\Delta t}. \quad (38)$$

Подставляем (38) в уравнение (37):

$$\lambda_0 \tau \left(A_1 + \left(\frac{\lambda_1}{2} A_1^2 + \frac{B_1 - A_1}{2 \Delta t} \right) \tau \right) = S_1 \quad (39)$$

Находим решение системы (36), (39):

$$\lambda_0 = \frac{S_1 - S_0 A_1^2}{\tau \left(A_1 - A_1^2 + (B_1 - A_1) \mu \right)}, \quad (40)$$

$$\lambda_1 = \frac{2(S_0 A_1 + S_0 (B_1 - A_1) \mu - S_1)}{\tau (S_1 - S_0 A_1^2)}, \quad (41)$$

где $\mu = \frac{\tau}{2 \Delta t}$.

Из предположений (19), (21) имеем

$$0 < A_1^2 < A_1 < B_1 < 1, \quad (42)$$

и знаменатель (40) положителен. Согласно (22) числитель (40) и знаменатель (41) положительны. Следовательно, выражения (40), (41) определены, причем $\lambda_0 > 0$. Теорема 2 доказана.

Найденные параметры λ_0 , λ_1 и комбинации параметров

$$a = \frac{g_0}{f_0}, \quad p_0 = e^{\frac{\lambda_0}{f_0}}, \quad p_1 = a f_1 - g_1,$$

$$p_2 = \lambda_0 (g_2 - a f_2), \quad p_3 = \lambda_1 - \frac{2 f_1 \lambda_0}{f_0}$$

позволяют определить следующие коэффициенты разложений (8) - (10):

$$f_0 = \frac{\lambda_0}{\ln p_0}; \quad g_0 = a f_0; \quad f_1 = \frac{(\lambda_1 - p_3) f_0}{2 \lambda_0};$$

$$g_1 = a f_1 - p_1; \quad g_2 - a f_2 = \frac{p_2}{\lambda_0}. \quad (43)$$

Параметры g_2, f_2 входят в первые члены асимптотики (14) - (17) только в виде комбинации $g_2 - af_2$. Эти параметры можно найти из следующих членов асимптотики (11). Если ограничиться двумя членами асимптотики, то можно положить

$$g_2 = \frac{p_2}{\lambda_0}, \quad f_2 = 0. \quad (44)$$

Оценка точности найденных параметров. Простая система

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x} = 0; \quad (45)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = (1 - S)C \quad (46)$$

с краевыми условиями (3) - (5) при $K = k$ имеет точное решение [18, 19]

$$C^{(k)}(x, t) = \begin{cases} 0, & t < x \\ \frac{ke^{k(t-x)}}{e^{k(t-x)} + e^x - 1}, & t > x \end{cases}; \quad (47)$$

$$S^{(k)}(x, t) = \begin{cases} 0, & t < x \\ \frac{e^{k(t-x)} - 1}{e^{k(t-x)} + e^x - 1}, & t > x \end{cases}. \quad (48)$$

Коэффициенты разложений (8) - (10) равны

$$g_0 = f_0 = 1, \quad g_1 = g_2 = f_1 = f_2 = 0, \\ \lambda_0 = 1, \quad \lambda_1 = -1, \quad t_0 = a = 1. \quad (49)$$

Коэффициентам (49) соответствуют следующие значения параметров (13):

$$p_0 = e, \quad p_1 = 0, \quad p_2 = 0, \quad p_3 = -1. \quad (50)$$

Решение (47), (48) позволяет вычислить точные значения концентраций взвешенных и осажденных частиц на входе и выходе фильтра:

$$C^{(k)}(1, t_0) = C_{\text{exp}}^{(k)}(t_0) = A_k = \frac{k}{e}; \quad (51)$$

$$C^{(k)}(1, t_0 + \Delta t) = C_{\text{exp}}^{(k)}(t_0 + \Delta t) = B_k = \frac{ke^{k\Delta t}}{e^{k\Delta t} + e - 1}; \quad (52)$$

$$S^{(1)}(0, \tau) = S_0 = \frac{e^\tau - 1}{e^\tau}; \quad (53)$$

$$S^{(1)}(1, \tau + t_0) = S_1 = \frac{e^\tau - 1}{e^\tau + e - 1}. \quad (54)$$

Нетрудно проверить, что найденные значения удовлетворяют условиям (19) - (22).

Вычислим параметры разложений (14) - (17) по значениям (51) - (54). Из (26), (27) следует, что p_0 и p_1 совпадают со значениями (50). Из (32), (33)

$$p_2 = \frac{f(1) - kf(k)}{(e+1)(k-1)}, \quad p_3 = \frac{k(f(k) - f(1))}{e(k-1)}, \quad (55)$$

где $f(k) = \frac{e^2(e^{k\Delta t} - 1)}{k^2\Delta t(e^{k\Delta t} + e - 1)}$. Имеем $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} f(k) = \frac{e}{k}$ и $p_2 \rightarrow 0, p_3 \rightarrow -1$ при $\Delta t \rightarrow 0$.

Из (40), (41) находим: $\lambda_0 \rightarrow 1, \lambda_1 \rightarrow -1$ при $\Delta t \rightarrow 0, \tau \rightarrow 0$. Итак, предельные значения найденных параметров совпадают с точными значениями (50) g_2, f_2 .

Выводы. В работе определяются коэффициенты задачи фильтрации суспензии в пористой среде на основе сравнения асимптотического решения с заданными значениями концентраций взвешенных и осажденных частиц на входе и выходе фильтра. Пример простой системы позволяет оценить неустранимую погрешность метода, связанную с несовпадением точного решения и его асимптотики. Отметим, что погрешности измерений лабораторных экспериментов также влияют на точность нахождения коэффициентов.

Решение обратной задачи фильтрации позволяет рассчитать процесс фильтрации суспензии в пористой среде и сократить объем и стоимость лабораторных и полевых исследований [20].

Список литературы

1. *Massoudieh A., Ginn T.R.* Colloid-facilitated contaminant transport in unsaturated porous media // G. Hanrahan (Ed.), *Modelling of Pollutants in Complex Environmental Systems*, ILM Publications, Hertfordshire, Glensdale. - 2010. - V. 2.
2. *Noubactep C., Care S.* Dimensioning metallic iron beds for efficient contaminant removal // *Chemical Engineering Journal*. - 2010. - V. 163. - P. 454–460.
3. *Gitis V., Dlugy C., Ziskind G., Sladkevich S., Lev O.* Fluorescent clays – similar transfer with sensitive detection // *Chemical Engineering Journal*. - 2011. - V. 174. - P. 482–488.
4. *Bradford S., Kim H., Haznedaroglu B., Torkzaban S., Walker S.* Coupled factors influencing concentration-dependent colloid transport and retention in saturated porous media // *Environ. Sci. Technol.* - 2009. - V. 43. - P. 6996–7002.
5. *Gitis V., Rubinstein I., Livshits M., Ziskind G.* Deep-bed filtration model with multistage deposition kinetics // *Chemical Engineering Journal*. - 2010 - V. 163. - P. 78–85.
6. *Bedrikovetsky P.* Upscaling of Stochastic Micro Model for Suspension Transport in Porous Media // *Transport in Porous Media*. - 2008. - V. 75. - P. 335–369.
7. *You Z., Badalyan A., Bedrikovetsky P.* Size-Exclusion Colloidal Transport in Porous Media–Stochastic Modeling and Experimental Study // *SPE Journal*. - 2013. - V. 18. - P. 620–633.
8. *Chalk P., Gooding N., Hutten S., You Z., Bedrikovetsky P.* Pore size distribution from challenge coreflood testing by colloidal flow // *Chemical Engineering Research and Design*. - 2012. - V. 90. - P. 63–77.
9. *Santos A., Bedrikovetsky P.* A stochastic model for particulate suspension flow in porous media // *Transport in Porous Media*. - 2006. - V. 62. - P. 23–53.
10. *Yuan H., You Z., Shapiro A., Bedrikovetsky P.* Improved population balance model for straining-dominant deep bed filtration using network calculations // *Chemical Engineering Journal*. - 2013. - V. 226. - P. 227–237.
11. *Kuzmina L.I., Osipov Yu.V.* Asymptotic solution for deep bed filtration with small deposit // *Procedia Engineering*. - 2015. - V. 111. - P. 491–494.
12. *Kuzmina L.I., Osipov Yu.V.* Calculation of filtration of polydisperse suspension in a porous medium // *Matec Web of Conferences*. - 2016. - V. 86, 01005. - 6 p.
13. *Kuzmina L.I., Osipov Yu.V., Galaguz Yu. P.* A model of two-velocity particles transport in a porous medium // *International Journal of Non-linear Mechanics*. - 2017. - V. 93. - P. 1–6.
14. *Osipov Yu.V., Kuzmina L.I.* Calculation of the filtration of polydisperse suspension with a small rate // *Matec Web of Conferences*. - 2017. - V. 117, 00131. - 6 p.
15. *You Z., Osipov Yu. V., Bedrikovetsky P., Kuzmina L. I.* Asymptotic model for deep bed filtration // *Chemical Engineering Journal*. - 2014. - V. 258. - P. 374–385.
16. *You Z., Bedrikovetsky P., Kuzmina L.I.* Exact Solution for Long-Term Size Exclusion Suspension-Colloidal Transport in Porous Media // *Abstract and Applied Analysis. Iss. "Mathematical and Computational Analyses of Flow and Transport Phenomena"*. - 2013. - V. 2013. - 9 p.
17. *Kuzmina L.I., Osipov Yu.V.* Particle transportation at the filter inlet // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. - 2013. - V. 9. - P. 31–39.
18. *Herzig J.P., Leclerc D.M., Legoff P.* Flow of suspensions through porous media – application to deep filtration // *Industrial and Engineering Chemistry*. - 1970. - V. 62. - P. 8–35.
19. *Vyazmina E.A., Bedrikovetskii P.G., Polyagin A.D.* New classes of exact solutions to nonlinear sets of equations in the theory of filtration and convective mass transfer // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. - 2007. - V.41, no. 5. - P. 556–564.
20. *Bedrikovetsky P.G., Marchesin D., Checaira F., Serra A.L., Resende E.* Characterization of deep bed filtration system from laboratory pressure drop measurements // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. - 2001. - V. 32, no. 3. - P. 167–177.

01.01.06

В.В. Дружинин д.ф.-м.н.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Саровский физико-технический институт, кафедра высшей математики,
г. Саров, vvdr@newmail.ru

СТРУКТУРА ЧИСЕЛ ФИБОНАЧЧИ**DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-14-16**

Получены новые формулы связи простых чисел и чисел Фибоначчи, позволяющих получить их каноническое разложение. Найдены формулы генерации простых чисел через золотое сечение. Сделан вывод о бесконечности простых чисел Фибоначчи.

Ключевые слова: каноническое разложение, числа Фибоначчи.

Числа Фибоначчи (ЧФ) получаются друг из друга сложением,

$$F_{n+2} \equiv F(n+2) = F(n+1) + F(n) = \{ \dots -1; 1; 0; 1; 1; 2; 3; 5; 8; 13; 21; 34; 55; 89; 144; 233; \dots \}, \quad (1)$$

где n - целое число. ЧФ имеют такую нумерацию: $F(0) = 0$; $F(1) = 1$; $F(2) = 1$; $F(3) = 2$; $F(4) = 3$; $F(5) = 5$; $\dots$ $F(-n) = (-1)^{n+1}F(n)$. Они играют большую роль в математике, физике, природе (размножение животных, филлотаксис – расположение листьев на ветвях и семян подсолнуха, строение раковин, галактик) и даже в искусстве (золотое сечение, индийская поэзия). В фугах Баха также используют частоты, состоящие из ЧФ. Имеется огромная математическая литература по свойствам и приложениям ЧФ, но есть и некоторые нерешенные задачи в этой области [1, 2]. Например, какие из ЧФ есть простые числа (ПЧ), а также конечно или бесконечно их количество? В литературе доказана теорема: если ЧФ есть ПЧ, т.е. $F(n) = p \in \mathbb{P}$, то номер ЧФ n также ПЧ, кроме $n = 4$. Далее будем обозначать ПЧ буквой p . В символике эта теорема записывается так: $F(n) \in \mathbb{P} \Rightarrow n \in \mathbb{P}$, т.е. она имеет необходимый характер. Задача состоит в том, чтобы сделать эту теорему необходимой и достаточной, т.е. записать ее в виде $F(p) \in \mathbb{P} \Leftrightarrow p \in \mathbb{P}$ и определить те ПЧ p , которые будучи номером ЧФ, дают ПЧ $F(p)$.

Вначале рассмотрим соотношение ЧФ и ПЧ. Оказывается между номерами ЧФ и каноническим разложением ЧФ на ПЧ есть прямые связи, позволяющие создавать простые числа, т.е. фактически возникает формула простого числа, похожая на теорему Вильсона, но значительно более простая в употреблении. ЧФ связаны с золотым сечением φ , иррациональным числом

$$\varphi = ((1 + \sqrt{5})/2) = 1.618033989\dots, \quad (2)$$

формулой Бине

$$F(n) = \frac{\varphi^n - (\varphi - \sqrt{5})^n}{\sqrt{5}} = \left[\frac{\varphi^n}{\sqrt{5}} \right]. \quad (3)$$

В (3) использована специальная скобка $[x]$, дающая целое число наиболее близкое к x . Например, $[3.9] = [4.2] = 4$. Разделим все ПЧ, кроме $p = \{2; 5\}$, на два класса: $\bar{p} = 10t \pm 1$ и $\tilde{p} = 10t - 5 \pm 2$, $t \in \mathbb{N}$. Известна такая теорема: если $F(n)$ кратно p ($p|F(n)$; $F(n) \equiv 0(mod p)$), то все $F(nt)$ также делятся на p . В символике эта теорема записывается так

$$p|F(n) \Rightarrow p|F(nt). \quad (4)$$

Нами доказаны новые свойства ЧФ, которые мы не нашли в учебниках и монографиях. В табл.1 приведены первые «34» ЧФ.

В частности нами сформулирована теорема I:

$$\bar{p}|(F(\bar{p}) - 1); \quad \tilde{p}|(F(\tilde{p}) + 1), \quad (5)$$

т.е. $(F(\bar{p}) - 1)$ кратно $\bar{p}$ и $(F(\tilde{p}) + 1)$ кратно $\tilde{p}$.

Табл. 1 Номера и канонические разложения ЧФ

n	$F(n)$	n	$F(n)$
1	1	18	$2^3 \cdot 17 \cdot 19 = 2584$
2	1	19	$37 \cdot 113 = 4181$
3	2	20	$3 \cdot 5 \cdot 11 \cdot 41 = 6765$
4	3	21	$2 \cdot 13 \cdot 421 = 10946$
5	5	22	$89 \cdot 199 = 17711$
6	$2^3 = 8$	23	28657
7	13	24	$2^5 \cdot 3^2 \cdot 7 \cdot 23 = 46368$
8	$3 \cdot 7 = 21$	25	$5^2 \cdot 3001 = 75025$
9	$2 \cdot 17 = 34$	26	$233 \cdot 521 = 121393$
10	$5 \cdot 11 = 55$	27	$2 \cdot 17 \cdot 53 \cdot 109 = 196418$
11	89	28	$3 \cdot 13 \cdot 29 \cdot 281 = 317811$
12	$2^4 \cdot 3^2 = 144$	29	514229
13	233	30	$2^3 \cdot 5 \cdot 11 \cdot 31 \cdot 61 = 832040$
14	$13 \cdot 29 = 377$	31	$557 \cdot 2417 = 1346269$
15	$2 \cdot 5 \cdot 61 = 610$	32	$3 \cdot 7 \cdot 47 \cdot 2207 = 2178309$
16	$3 \cdot 7 \cdot 47 = 987$	33	$2 \cdot 89 \cdot 1981 = 3524578$
17	1597	34	$1597 \cdot 3571 = 5702887$

Доказательство. По формуле Бине, если $p = 2m + 1$, то

$$F(p) \pm 1 = \sum_{t=0}^{m-1} \binom{p}{2t+1} \frac{5^t}{2^{2m}} + \frac{5^{m \pm 2^{2m}}}{2^{2m}}. \quad (6)$$

Первое слагаемое в правой части кратно p из-за биномиальных коэффициентов. $2^{2m} \equiv 1 \pmod{p}$ по малой теореме Ферма, $5^m \equiv 1 \pmod{\bar{p}}$, $5^m \equiv -1 \pmod{\tilde{p}}$ по фактору Лежандра. Отсюда второе слагаемое в правой части (6) также кратно p . Например, $F(11) = 89$, $F(11) - 1 = 8 \cdot 11$, $F(7) = 13$, $F(7) + 1 = 2 \cdot 7$.

Точно также, используя (6), доказываются теорема II:

$$\bar{p} | F(t\bar{p} - t); \quad \tilde{p} | F(t\tilde{p} + t). \quad (7)$$

Например, $F(11 - 1) = 5 \cdot 11$, $F(22 - 2) : 11$; $F(7 + 1) = 3 \cdot 7$.

Следствия из теорем I и II, полученные с использованием рекуррентной формулы (1) для любого целого t следующие:

$$\{F(\bar{p} - t) + (-1)^{t+1}F(t - 1)\} \equiv 0 \pmod{\bar{p}}; \quad (8)$$

$$\{F(\bar{p} + t) - F(t + 1)\} \equiv 0 \pmod{\bar{p}}; \quad (9)$$

$$\{F(\tilde{p} - t) + (-1)^tF(t + 1)\} \equiv 0 \pmod{\tilde{p}}; \quad (10)$$

$$\{F(\tilde{p} + t) + F(t - 1)\} \equiv 0 \pmod{\tilde{p}}. \quad (11)$$

Примеры: $F(11 - 4) - F(3) = 13 - 2 = 11$; $F(11 + 4) - F(5) = 610 - 5 = 11 \cdot 55$; $F(13 - 2) + F(3) = 89 + 2 = 7 \cdot 13$; $F(13 + 2) + F(1) = 610 + 1 = 47 \cdot 13$.

Из (6) и (7) вытекают также такие свойства. 1. Если $\tilde{p} < n < \bar{p} = \tilde{p} + 2$, то $(\tilde{p} \cdot \bar{p}) | F(n)$. Например, $F(18) = 2^3 \cdot 17 \cdot 19$. 2. У ЧФ $F(2p)$ последняя цифра ЧФ и последняя цифра ПЧ совпадают. Например, $F(2 \cdot 7) = 377$, $p = 7$. Это свойство можно использовать для канонического разложения больших ЧФ. 3. Более того, $F(2p) = F(p) \cdot S$, где $S = [\varphi^p]$. Например, $F(2 \cdot 19) = F(38) = 37 \cdot 113 \cdot 9349$; $[\varphi^{19}] = [(1.168034)^{19}] = [9349.001 \dots]$. 4. Возникают новые формулы генерации ЧФ

$$\begin{aligned} F(7 + t) + F(t - 1) &= 7 \cdot F(t + 3); \quad F(11 + t) - F(t + 1) = 11 \cdot F(t + 6); \\ F(19 - t) + (-1)^{t+1}F(t - 1) &= 19 \cdot 4 \cdot F(10 - 1); \\ F(31 - t) + (-1)^{t+1}F(t - 1) &= 31 \cdot 44 \cdot F(16 - 1). \end{aligned} \quad (12)$$

Например, при $t = -1$ имеем $F(7 - 1) + F(-2) = 7 \cdot F(2) = 8 - 1$.

Из (8) и (10) следует необходимое и достаточное условие связи ЧФ и ПЧ. Теорема IV: если $p = 4\mu + 1$, то

$$F(2\mu) \equiv 0 \pmod{\bar{p}}; \quad F(2\mu + 1) \equiv 0 \pmod{\tilde{p}}. \quad (13)$$

Докажем первое сравнение. Если $\bar{p} = 4\mu + 1$, то взяв $t = 2\mu + 1$ и подставив это значение в (8), получим $F(2\mu) + F(2\mu) \equiv 0 \pmod{\bar{p}}$. Например, $\bar{p} = 61 = 4 \cdot 15 + 1$; $F(30) = 321824 \cdot 61$; $\tilde{p} = 17 = 4 \cdot 4 + 1$; $F(9) = 2 \cdot 17$.

Если $p = 2m + 1$ и m нечетное, то возникают такие сравнения

$$\begin{aligned} \{F(m+1) + F(m-1)\} &= 0(\text{mod } \bar{p}); \\ \{F(m+2) + F(m)\} &= 0(\text{mod } \tilde{p}). \end{aligned} \quad (14)$$

Например, $\bar{p} = 11 = 2 \cdot 5 + 1$; $F(6) + F(4) = 8 + 3 = 11$; $\tilde{p} = 23 = 2 \cdot 11 + 1$; $F(13) + F(11) = 233 + 89 = 14 \cdot 23$.

Зная таблицу кратности ЧФ, можно составить решето Эратосфена для определения ПЧ в таблице ЧФ. Среди первых 200 ЧФ насчитывается всего двенадцать ПЧ:

$$\begin{aligned} F(3) &= 2; F(4) = 3; F(5) = 5; F(7) = 13; F(11) = 89; F(13) = 233; \\ F(17) &= 1\,597; F(23) = 28\,657; F(29) = 514\,229; \\ F(43) &= 433\,494\,437; F(47) = 2\,971\,215\,073; \\ F(137) &= 19\,134\,702\,400\,093\,278\,081\,449\,423\,917. \end{aligned}$$

Полученные выше соотношения позволяют генерировать ПЧ по каноническому разложению ЧФ. Например, найдем состав $F(19)$. Так как $\tilde{p} = 37 = 38 - 1$, то по (7) $F(38) = 19 \cdot 2 : 37$. По свойству кратности $F(19) : 37$. Так как $\tilde{p} = 113 = 114 - 1$, то $F(114) = 19 \cdot 6 : 113$. Отсюда находим состав $F(19) = 4181 = 37 \cdot 113$. Далее найдем состав $F(20)$. Найдем все нетривиальные делители числа «20». Это $\{2; 4; 5; 10\}$. ЧФ с этими номерами содержат ПЧ $\{3; 5; 11\}$ и все эти ПЧ в ненулевой степени обязательно входят в состав $F(20)$. В разложении $F(20)$ есть число « $3 \cdot 5 \cdot 10$ ». Далее найдем присоединенное ПЧ. Так как $2 \cdot 20 = 40$, а $F(41) = F(2 \cdot 20 + 1)$, то по (7) $41 | F(2 \cdot 20)$. Следовательно, возможно $41 | F(20)$, что реализуется. Величину $F(20)$ можно оценить по формуле (3) или по полученной нами формуле $\log_{10} F_n \approx n \cdot 0.209 - 0.35$. Окончательно, $F(20) = 3 \cdot 5 \cdot 11 \cdot 41$.

Нахождение ПЧ через ЧФ по формулам теоремы IV

$$\left\lfloor \frac{\varphi^{2\mu}}{\sqrt{5}} \right\rfloor \equiv 0(\text{mod } (\bar{p} = 4\mu + 1)); \quad (15)$$

$$\left\lfloor \frac{\varphi^{2\mu+1}}{\sqrt{5}} \right\rfloor \equiv 0(\text{mod } (\tilde{p} = 4\mu + 1)) \quad (16)$$

внешне напоминает знаменитую теорему Вильсона: если $n | \{(n-1)! + 1\}$, то n есть ПЧ. Однако, формулы (15-16) оперирует со значительно более малыми числами, чем теорема Вильсона. Например, проверим на простоту число $61 = 2 \cdot 30 + 1$. По (15) берем $F(30) = 832040 = 13640 \cdot 61$. Отсюда следует, что «61» есть ПЧ. По теореме Вильсона нам необходимо работать с числом $60! \approx 8.32 \cdot 10^{81}$, которое не каждый компьютер обработает.

Таким образом, найденные формулы связи золотого сечения и простых чисел, с одной стороны, позволяют находить канонические разложения ЧФ, а, с другой стороны, дают сравнительно экономный алгоритм генерации ПЧ.

Далее обсудим вопрос о количестве ПЧ среди ЧФ. Частично этот вопрос обсуждался в [3]. Нам представляется, что таких чисел бесконечное количество. Так как таблица номеров есть натуральный ряд, то начнем удалять числа, дающие составные ЧФ. Это арифметические прогрессии (АП) с $t \geq 1$: $\{3 + 3t\}$ удаляются четные ЧФ; $\{4 + 4t\}$, удаляются ЧФ кратные «3»; $\{5 + 5t\}$ ($5 | \text{ЧФ}$); $\{7 + 7t\}$ ($13 | \text{ЧФ}$); $\{11 + 11t\}$ ($89 | \text{ЧФ}$) и так далее. Знаменитая функция Эйлера $\varphi(m) = \prod_s^m (p_s - 1)$ дает количество не удаленных чисел на отрезке $[1, T_m]$ АП $\{a_s + p_s t\}$, $1 \leq a_s \leq p_s$. В нашем случае это будут номера простых и составных ЧФ. Рассмотрим пример. Пусть есть три АП: $3 + 3t$; $4 + 4t$; $5 + 5t$, $T_3 = 60$, $\varphi(3) = 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$. Вероятность обнаружить не удаленное число $\omega(3) = \varphi(3)/T_3 = 0.4$. Возьмем отрезок $[1, 17]$ длиной $L = 17$. По теории вероятностей среднее число не удаленных чисел $\bar{N} = L \cdot \omega(3) = 6.8$. Реально на этом отрезке есть семь номеров простых ЧФ с $\hat{n} = \{3; 4; 5; 7; 11; 13; 17\}$. Из этого примера следует, что среднее число простых ЧФ на произвольном отрезке (при $L < T_m$) $\bar{N}(L) = L\varphi(m)/T_m = L\omega(m)$. Поскольку $\omega(m)$ убывающая, но ограниченная последовательность, то число $\bar{N}(L)$ неограниченно и количество простых ЧФ бесконечно.

Список литературы

1. Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О. Конкретная математика, М. Мир, 1998, р. 322.
2. Бухштаб В.В. Теория чисел. С-П.-М., Лань, 2015.
3. Druzhinin V.V. // NJDIS, No. 13, р. 43-45, 2017.

01.01.02

В.Ш. Ройтенберг

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

О БИФУРКАЦИЯХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ КУСОЧНО-ГЛАДКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-17-20

Описаны бифуркации кусочно-гладкого векторного поля коразмерности два в окрестности его периодической траектории, проходящей через точку стыка линий разрыва поля.

Ключевые слова: кусочно-гладкое векторное поле, периодическая траектория, бифуркационная диаграмма.

Пусть $X_\varepsilon = (X_\varepsilon^1, \dots, X_\varepsilon^m)$ – семейство кусочно-гладких векторных полей, заданных на многообразии с углами $M \subset \mathbf{R}^2$ с разбиением $D = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ на многообразия с углами $[1, 2]$, зависящее от параметра $\varepsilon \in E$, принадлежащего некоторой окрестности E нуля в $\mathbf{R}^2$. Будем считать, что отображения $M_i \times E \ni (z, \varepsilon) \mapsto X_\varepsilon^i(z)$ принадлежат классу C^r и могут быть продолжены до C^r -отображений на $M \times E$ ($r \geq 1$).

В работе [3] изучались бифуркации в окрестности периодической траектории, проходящей через точку O , являющейся 2-угловой точкой для всех элементов разбиения D , ее содержащей. В настоящей работе будем предполагать, что точка O является 1-угловой для M_1 .

Пусть точка $O \in \text{int } M \setminus \bigcup_{i=1}^m \text{int } M_i$ является 1-угловой для M_1 и 2-угловой для M_i , $i \in \{2, \dots, n\}$, $n \leq m$. Можно считать, что нумерация $M_1, M_2, \dots, M_n$ выбрана так, что в C^{r+1} -координатах (x, y) в некоторой окрестности V^* точки O точка O имеет координаты $(0, 0)$, $M_1 \cap V^*$ задается неравенствами $x^2 + y^2 < 1$, $y \leq 0$, $L_i := \partial M_i \cap \partial M_{i+1} \cap V^*$ при $i = 1, 2, \dots, n-1$ и $L_i := \partial M_1 \cap \partial M_n \cap V^*$ при $i = n$ является образом при C^{r+1} -вложении $\eta_i: [0, 1] \rightarrow M$, $\eta_i(0) = O$, $\eta_1(s) = (s, 0)$, $\eta_n(s) = (-s, 0)$. Тогда $\partial M_1 \cap V^* = L_1 \cup L_n$, для $i \in \{2, \dots, n\}$ $\partial M_i \cap V^* = L_{i-1} \cup L_i$, а реперы $(\eta'_{i-1}(0), \eta'_i(0))$, $i \in \{2, \dots, n\}$, положительно ориентированы.

В координатах (x, y) $X_\varepsilon^1(x, y) = P(x, y, \varepsilon)\partial/\partial x + Q(x, y, \varepsilon)\partial/\partial y$, где P и Q – C^r -функции на $\{(x, y): x^2 + y^2 < 1, y \leq 0\} \times E$.

Предположим, что для поля $X_0 = (X_0^1, \dots, X_0^m)$ выполняются условия:

(У1) $P(0, 0, 0) > 0$, $Q(0, 0, 0) = 0$, $Q'_x(0, 0, 0) > 0$.

(У2) Существуют такие числа $2 \leq \alpha < \omega \leq n$, что реперы $(\eta'_i(0), X_0^i(O))$ и $(\eta'_i(0), X_0^{i+1}(O))$ для $i \in \{1, \dots, \alpha-1\}$ и $i \in \{\omega, \dots, n\}$ положительно ориентированы, а для $i \in \{\alpha, \dots, \omega-1\}$ отрицательно ориентированы. (Здесь $X_0^{n+1} = X_0^1$.)

В силу (У1) и (У2) из точки O выходит положительная (отрицательная) полутраектория Γ_0^+ (Γ_0^-) поля X_0 , начинающаяся как полутраектория поля X_0^α (X_0^ω). Потребуем выполнения условия

(У3) Полутраектории Γ_0^+ и Γ_0^- не содержат особых точек, отличных от O , и совпадают, образуя периодическую траекторию Γ_0 поля X_0 .

Пусть $\eta: (-1,1) \rightarrow \text{int } M_\alpha - C^r$ -вложение, трансверсальное полю X_0^α , такое, что $\eta(0) \in \Gamma_0$, а дуга $\eta(0,1)$ находится с положительной стороны Γ_0 . Ввиду (У1) – (У3) из [5, С. 175] и теоремы о трубке траекторий следует, что $\bar{u} > 0$ можно выбрать так, что определены C^r -отображения $\eta(u) \mapsto \eta(f_0^-(u))$, $u \in (-\bar{u}, 0]$, и $\eta(u) \mapsto \eta(f_0^+(u))$, $u \in [0, \bar{u})$, по траекториям поля X_0 , причем $f_0^\pm(0) = 0$, $(f_0^\pm)'(u) > 0$. Пусть $\mu_\pm := (f_0^\pm)'(0)$. Потребуем, чтобы

(У4) $\mu_- \neq 1$ и $\mu_+ \neq 1$.

При $\mu_- < 1, \mu_+ < 1$ ($\mu_- < 1, \mu_+ > 1$) Γ_0 является устойчивым (полуустойчивым) предельным циклом (рис. 1 и рис. 2). При $\mu_- > 1, \mu_+ > 1$ ($\mu_- > 1, \mu_+ < 1$) направление на траекториях меняется на противоположное.

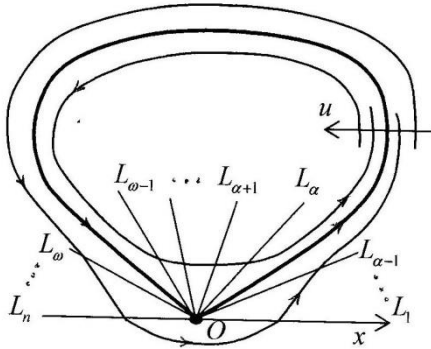


Рис. 1 – Траектории X_0 в окрестности цикла Γ_0 при $\mu_- < 1, \mu_+ < 1$

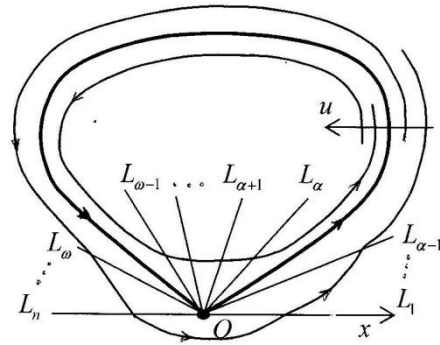


Рис. 2 – Траектории X_0 в окрестности цикла Γ_0 при $\mu_- < 1, \mu_+ > 1$

Из (У1) по теореме о неявной функции следует, что существуют такие число $v > 0$ и окрестность E_1 точки $0 \in E$, что для $\varepsilon \in E_1$ уравнение $Q(x, 0, \varepsilon) = 0$ имеет в интервале $(-v, v)$ решение $x = x_0(\varepsilon)$, при этом $x_0(\cdot) \in C^r$, $x_0(0) = 0$, $Q'_x(x_0(\varepsilon), 0, \varepsilon) > 0$. Обозначим O_ε точку с координатами $x = x_0(\varepsilon)$, $y = 0$. Из (У1) – (У3) и выбора трансверсали η следует, что окрестность E_1 можно выбрать столь малой, что при $\varepsilon \in E_1$ из точки O выходит положительная (отрицательная) полутраектория Γ_ε^+ (Γ_ε^-) поля X_ε , начинающаяся как полутраектория поля X_ε^α (X_ε^ω) и пересекающая дугу $\eta(-1,1)$ в точке $\eta(u_\alpha(\varepsilon))$ ($\eta(u_\omega(\varepsilon))$), где $u_\alpha(\cdot) \in C^r$, $u_\omega(\cdot) \in C^r$, $u_\alpha(0) = u_\omega(0) = 0$. Обозначим $u_0(\varepsilon) := u_\omega(\varepsilon) - u_\alpha(\varepsilon)$. Теперь мы можем сформулировать условие

(У5) Векторы $\partial x_0(0)/\partial \varepsilon$ и $\partial u_0(0)/\partial \varepsilon$ линейно независимы.

Если это условие выполняется, то в некоторой окрестности $E_2 \subset E_1$ точки $0 \in E$ можно выбрать C^r -координаты $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ так, что $x_0(\varepsilon) = \varepsilon_1$, $u_0(\varepsilon) = \varepsilon_2$ (рис. 3). отождествим точку $\varepsilon \in E_2$ с ее координатной строкой: $\varepsilon \equiv (\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ и будем считать $E_2 = (-\delta_*, \delta_*)^2$ при некотором $\delta_* > 0$.

Под бифуркационной диаграммой семейства векторных полей X_ε , $\varepsilon \in E_0 \subset E_2$, в области $U \subset M$ будем понимать разбиение E_0 на классы эквивалентности по следующему отношению эквивалентности: $\varepsilon \sim \varepsilon^*$ тогда и только тогда, когда X_ε и X_{ε^*} топологически эквивалентны в U .

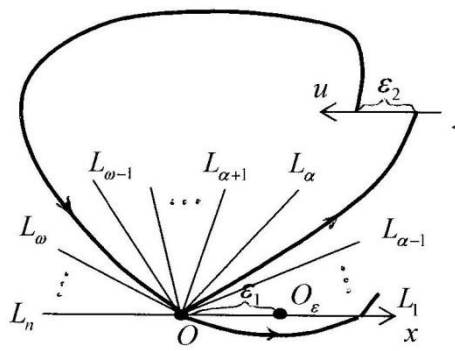


Рис. 3 – Выбор параметров ε_1 и ε_2

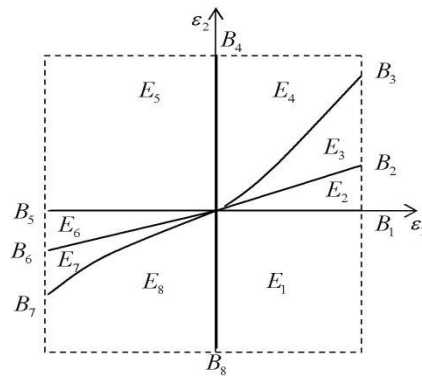


Рис. 4 – Бифуркационная диаграмма

Теорема. 1. Пусть выполняются условия (У1) – (У5). Тогда найдется окрестность U кривой Γ_0 , граница которой состоит из двух замкнутых кривых Γ^+ и Γ^- , лежащих, соответственно, с положительной и отрицательной стороны Γ_0 , и числа $\delta, \delta_0 \in (0, \delta_*)$ такие, что бифуркационная диаграмма семейства X_ε , $\varepsilon \in (-\delta_0, \delta_0) \times (-\delta, \delta)$, в U представляет собой разбиение $(-\delta_0, \delta_0) \times (-\delta, \delta)$ на множества E_i , $i \in \{1, 2, \dots, 8\}$, и B_j , $j \in \{0, 1, \dots, 8\}$ (рис. 4), где $B_0 = \{0, 0\}$, $B_1 = (0, \delta_0) \times \{0\}$, $B_4 = \{0\} \times (0, \delta)$, $B_5 = (-\delta_0, 0) \times \{0\}$, $B_8 = \{0\} \times (-\delta, 0)$, при $j = 2, 3$ $B_j = \{\varepsilon : \varepsilon_2 = \beta_j(\varepsilon_1)\}$, $\beta_j : (0, \delta_0) \rightarrow (0, \delta)$, $\beta_j \in C^r$, $\beta_j(+0) = 0$, $\beta_2(\varepsilon_1) < \beta_3(\varepsilon_1)$, при $k = 6, 7$ $B_k = \{\varepsilon : \varepsilon_2 = \beta_k(\varepsilon_1)\}$, $\beta_k : (-\delta_0, 0) \rightarrow (-\delta, 0)$, $\beta_k \in C^r$, $\beta_k(-0) = 0$, $\beta_7(\varepsilon_1) < \beta_6(\varepsilon_1)$, $E_1 = (0, \delta_0) \times (-\delta, 0)$, $E_2 = \{\varepsilon : 0 < \varepsilon_2 < \beta_2(\varepsilon_1)\}$, $E_3 = \{\varepsilon : \beta_2(\varepsilon_1) < \varepsilon_2 < \beta_3(\varepsilon_1)\}$, $E_4 = \{\varepsilon : \beta_3(\varepsilon_1) < \varepsilon_2 < \delta\}$, $E_5 = (-\delta_0, 0) \times (0, \delta)$, $E_6 = \{\varepsilon : \beta_6(\varepsilon_1) < \varepsilon_2 < 0\}$, $E_7 = \{\varepsilon : \beta_7(\varepsilon_1) < \varepsilon_2 < \beta_6(\varepsilon_1)\}$, $E_8 = \{\varepsilon : -\delta < \varepsilon_2 < \beta_7(\varepsilon_1)\}$.

2. В случае $\mu_- < 1, \mu_+ < 1$ структура фазовых портретов векторных полей X_ε , $\varepsilon \in (-\delta_0, \delta_0) \times (-\delta, \delta)$, в окрестности U следующая:

При $\varepsilon \in E_2 \cup B_2 \cup E_3$ X_ε имеет две устойчивые гиперболические периодические траектории Γ_i^s ($i = 1, 2$) и одну неустойчивую периодическую траекторию, содержащую дугу ON_ε неустойчивой линейной особенности OO_ε ($N_\varepsilon = O_\varepsilon$ при $\varepsilon \in B_2$). Остальные траектории ω -предельны Γ_1^s или Γ_2^s .

При $\varepsilon \in B_1$ ($\varepsilon \in B_3$) X_ε имеет одну устойчивую гиперболическую периодическую траекторию Γ_1^s и периодическую траекторию Γ_2 , проходящую через особую точку O ; траектории, начинающиеся в точках области между кривыми Γ^- и Γ_2 , ω -предельны к Γ_1^s (Γ_2), а начинающиеся в точках области между кривыми Γ^+ и Γ_2 , ω -предельны Γ_2 (Γ_1^s).

При $\varepsilon \in E_4 \cup B_4 \cup E_5 \cup E_8 \cup B_8 \cup E_1$ X_ε имеет устойчивую гиперболическую периодическую траекторию Γ^s ; остальные траектории, начинающиеся в U , ω -предельны к ней. При $\varepsilon \in B_5 \cup E_6 \cup B_6 \cup E_7 \cup B_7$ X_ε имеет периодическую траекторию Γ^s , содержащую дугу ON_ε устойчивой линейной особенности OO_ε ($ON_\varepsilon = O$, если $\varepsilon \in B_5$, $ON_\varepsilon = OO_\varepsilon$, если $\varepsilon \in B_7$); остальные траектории за конечное время входят в Γ^s .

3. В случае $\mu_- < 1, \mu_+ > 1$ структура фазовых портретов векторных полей X_ε , $\varepsilon \in (-\delta_0, \delta_0) \times (-\delta, \delta)$, в окрестности U следующая:

При $\varepsilon \in E_i$ ($i = 2, \dots, 7$) и $\varepsilon \in B_j$ ($j = 2, \dots, 6$) X_ε имеет устойчивую (неустойчивую) периодическую траекторию Γ^s (Γ^u). Если $\varepsilon \in E_i$, $i = 2, \dots, 5$, или $\varepsilon \in B_j$, $j = 2, 3, 4$ ($\varepsilon \in E_i$, $i = 4, \dots, 7$ или $\varepsilon \in B_j$, $j = 4, 5, 6$), то Γ^s (Γ^u)- гиперболическая траектория. Если $\varepsilon \in E_6 \cup E_7 \cup B_5 \cup B_6$, то Γ^s содержит дугу ON_ε устойчивой линейной особенности OO_ε ($ON_\varepsilon = O$ при $\varepsilon \in B_5$, $ON_\varepsilon = OO_\varepsilon$ при $\varepsilon \in B_6$). Если $\varepsilon \in E_2 \cup E_3 \cup B_2 \cup B_3$, то Γ^u содержит дугу ON_ε неустойчивой линейной особенности OO_ε ($ON_\varepsilon = O$ при $\varepsilon \in B_3$, $ON_\varepsilon = OO_\varepsilon$ при $\varepsilon \in B_2$). Положительные полутраектории, начинающиеся в точках между Γ^+ и Γ^u , либо ω -предельны к Γ^s , либо входят в Γ^s за конечное время, а начинающиеся между Γ^- и Γ^u , выходят из U .

При $\varepsilon \in B_1$ ($\varepsilon \in B_7$) X_ε имеет периодическую траекторию Γ , проходящую через точку O ; положительные траектории, начинающиеся в точках между Γ^+ и Γ ω -предельны к Γ (входят в Γ за конечное время), а начинающиеся в точках между Γ^- и Γ выходят из U .

При $\varepsilon \in B_1$ ($\varepsilon \in B_7$) все траектории X_ε выходят из U .

Список литературы

1. Ройтенберг В.Ш. О бифуркациях в окрестности точки стыка линий разрыва векторного поля // Научно-технический вестник Поволжья. 2016, № 5. С. 30–33.
2. Ройтенберг В.Ш. О бифуркациях в окрестности особой точки типа «сшитый трехкратный фокус» // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2017, № 2. С. 18–31.
3. Ройтенберг В.Ш. О бифуркациях периодической траектории кусочно-гладкого векторного поля на плоскости, проходящей через точку «стыка» линий разрыва поля. Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 11. Ярославль: Изд. ЯГТУ. С. 57-65.
4. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука. 224 с.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ (05.02.00)

05.02.18

А.П. Буйносов д.т.н.

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

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БАНДАЖЕЙ
КОЛЕСНЫХ ПАР ТЕПЛОВОЗОВ В ДЕПО СУРГУТ****DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-21-24**

В статье на основе выполненного сравнительного анализа износа колесных пар тепловозов в локомотивном депо Сургут предложено повысить ресурс бандажей за счет применения бандажей марки IV.

Ключевые слова: *тепловоз, колесная пара, бандаж, долговечность, повышение.*

Из анализа причин выхода из строя бандажей колесных пар тепловозов, приписанных к локомотивному депо Сургут (см. рис. 1) видно, что основными из них являются: износ гребня (80,4 %), прокат (11,8 %), разность диаметров (0,3 %), ослабление посадки (0,6 %), ползуны (4,3 %), остроконечный накат (2,6 %).



Рис. 1. Процентное соотношение причин выхода из строя бандажей колесных пар тепловозов

Снижение интенсивности износов гребней и рельсов удалось достигнуть в первую очередь благодаря массовому внедрению лубрикации. Причем наибольший эффект обеспечивается при смазке боковой грани головки рельса в кривых передвижными рельсосмазывателями (РС), установленными на локомотивах или пассажирских вагонах. Свой вклад также вносят гребнесмазыватели на локомотивах и стационарные путевые лубрикаторы.

В настоящее время средний ресурс бандажей колесных пар тепловозов в депо Сургут составляет 450 тыс. км [1], что примерно в полтора раза меньше, чем нормативный пробег до среднего ремонта локомотивов. Это приводит к необходимости преждевременных выкаток колесных пар из-под локомотива для смены бандажей и к дополнительным затратам на техническое обслуживание и ремонт локомотивного парка. В связи с этим задача доведения ресурса бандажей до 600–800 тыс. км [2] и более является весьма актуальной.

Одним из основных причин преждевременного исчерпания ресурса бандажей является несоответствие твердости бандажа и рельса. В эксплуатации до введения новых типов рельсов (Р65) были примерно одинаковые твердости как рельсов, так и бандажей, поэтому [3], наблюдалось примерное равенство износа рельсов и бандажей по объему металла на единицу выполненной работы (см. рис. 2).

В настоящее время твердость рельсов составляет 400–450 НВ, а твердость бандажей колесных пар электровозов – 269–302 НВ, а это значит, что при переходе на новый тип рельсов, с повышенной твердостью (объемно-закаленные), должен увеличиться как износ бандажей, так и рельсов.

Для увеличения ресурса бандажей специалисты ВНИИЖТ в сотрудничестве с работниками Нижнетагильского металлургического комбината (ОАО «НТМК») разработали бандажную сталь марки «IV» с повышенным содержанием углерода и хрома, уровнем твердости 320–360 НВ (ГОСТ 398–2010). Она существенно превосходит серийную бандажную сталь марки «II» по комплексу механических и служебных свойств.

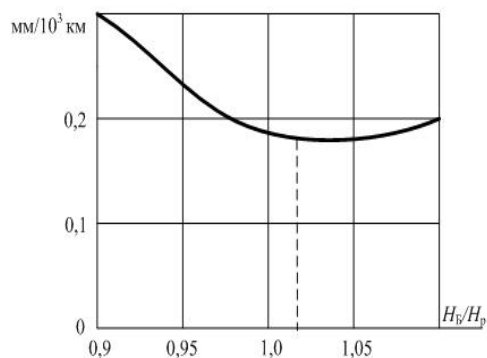


Рис. 2. Кривая зависимости износа бандажа от отношения его твердости к твердости рельсов

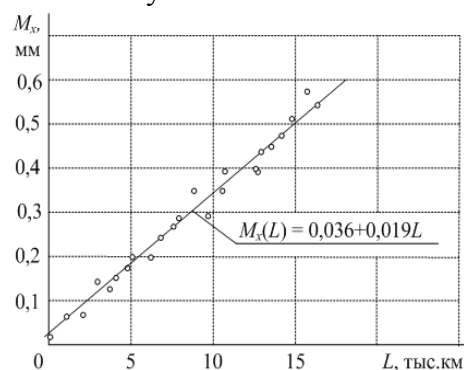


Рис. 3. Зависимость от пробега среднего значения износа гребней бандажей марки IV тепловоза ЧМЭЗ

В 2006 г. в научно-испытательном центре ВНИИЖТа были проведены полигонные испытания опытной партии бандажей повышенной твердости с содержанием углерода 0,73 %, изготовленных по техническим условиям ТУ 0941-096оп-01124323–2004. По результатам полигонных испытаний опытные бандажи показали высокие эксплуатационные свойства [4].

Сравнительные эксплуатационные испытания и мониторинг бандажей повышенной твердости и серийных проводили под руководством автора в 2016–2017 гг. В соответствии с методикой испытаний на общих основаниях эксплуатировались пять тепловозов с бандажами марки «IV». На каждом локомотиве одна секция (тележка) была оснащена опытными бандажами, другая – стандартными. Механические свойства опытных и серийных бандажей, проходящих испытание, представлены в табл. 1. Для оценки склонности бандажей с повышенным содержанием углерода к повреждаемости термическими трещинами и выщербинами тормозного характера одна тележка каждой секции локомотива была оснащена стандартными гребневыми тормозными колодками, другая – колодками УрГУПС [5]. Для создания максимально жестких условий эксплуатации опытных бандажей на локомотивах бортовые гребнесмазыватели были отключены.

Таблица 1 – Механические свойства опытных и серийных бандажей

Марка стали	№ плавки	Твердость, НВ	
		на глубине 20 мм	на гребне
II	30590	302	302
	30085	285	293
	10683	269	269
IV	13111	325	341

Осмотр и замеры профилей опытных и стандартных бандажей проводили в течение года с периодичностью 3–6 раз в месяц, что позволило накопить большой статистический материал. Для замеров параметров профиля бандажей (толщина гребня, крутизна гребня и прокат) использовался КИП-03 [6], толщина бандажей измерялась с помощью толщиномера. Замеры проводили на каждом бандаже в двух сечениях (результат замера – среднее

арифметическое двух полученных значений). Результаты всех замеров заносили в соответствующие протоколы. После этого проводились статистическая обработка полученных данных и расчет средних значений и среднеквадратических отклонений контролируемых колесных пар отдельно для опытных и стандартных бандажей по каждому локомотиву по методике [7, 8].

Все бандажи периодически осматривали на наличие эксплуатационных дефектов (термические трещины на гребне и поверхности катания, выщербины, ползуны, остроконечный накат и подрез гребня).

В табл. 2 представлены рассчитанные средние значения интенсивностей изнашивания гребней бандажей колесных пар всех тепловозов депо Сургут и отдельно для тепловоза ЧМЭЗ, а на рис. 3 – зависимость от пробега среднего значения износа гребней бандажей марки IV тепловоза ЧМЭЗ № 3742 (после обточки). Как следует из табл. 2, по итогам годичной эксплуатации средняя интенсивность изнашивания гребней опытных бандажей тепловозов примерно в 1,5 раза ниже, чем стандартных. Разница в износостойкости бандажей, обточенных до минимальной толщины, еще существеннее – интенсивность изнашивания опытных бандажей стала в 1,7 раза меньше. Увеличение разницы в интенсивностях изнашивания объясняется тем, что после обточки увеличилась разница в твердости рабочих слоев бандажей марок «IV» и «II» (легированная хромом сталь марки «IV» имеет более высокую прокаливаемость).

Таблица 2 – Средние значения интенсивности износа гребней бандажей

в мм/10⁴ км

Марка бандажа	Тепловозы	
	по всем локомотивам	ЧМЭЗ № 3742 (после обточки)
II	1,47	0,62
IV	1,01	0,36

Прокат тепловозных бандажей за все время испытаний был незначительный (не более 0,8 мм), выщербины на поверхности катания не появлялись. В процессе эксплуатации тепловозов на гребнях как стандартных, так и опытных бандажей в результате взаимодействия со стандартными тормозными колодками появлялись небольшие термические трещины длиной до 4 мм и глубиной до 0,2 мм. На гребнях бандажей, работающих в паре с тормозными колодками с глубоким зацепом, появлялись очень мелкие термические трещины длиной 1–2 мм (только при предельном износе или перекосе этих колодок). Последующего развития термических трещин в усталостные ни на опытных, ни на стандартных бандажах не происходило, и они затирались в процессе эксплуатации.

За время испытаний толщина бандажей тепловозов снизилась незначительно (опытных в среднем на 2 мм, стандартных – на 2,5 мм).

Выполненный в УрГУПС анализ интенсивности износа и частоты обточек бандажей марки «IV» показал, что их фактический ресурс составит не менее 600 тыс. км, что обеспечит межремонтный пробег локомотивов без смены бандажей. Склонность бандажей марки «IV» к появлению эксплуатационных дефектов в виде термических трещин на гребне не выше, чем у стандартных бандажей. В дальнейшем рекомендуется в паре как со стандартными, так и с перспективными бандажами эксплуатировать тормозные колодки с глубоким зацепом ввиду их минимального воздействия на гребень или колодки предложенные УрГУПС.

Список литературы

1. Горский А.В., Буйносов А.П. Анализ износа бандажей // Железнодорожный транспорт. 1991. № 1. С. 46-47.
2. Буйносов А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. 224 с.
3. Буйносов А.П. Взаимодействие колеса и рельса // Путь и путевое хозяйство. 1999. № 5. С. 22-25.
4. Буйносов А.П., Денисов Д.С. Сравнительный анализ износа колесных пар электровозов 2ЭС10 с различной маркой бандажей // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 84-86.
5. Буйносов А.П., Тихонов В.А. Повышение эффективности обработки бандажей триботехническим составом за счет изменения конструкции тормозной колодки // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 2. С. 48-50.
6. Буйносов А.П. Прибор для измерения параметров бандажей колесных пар тягового подвижного состава // Тяжелое машиностроение. 2011. № 3. С. 17-19.
7. Буйносов А.П. Методика определения ресурса бандажей колесных пар электровозов // Транспорт: наука, техника, управление. 2013. № 2. С. 37-39.
8. Буйносов А.П. Методика прогнозирования процесса изнашивания и определения ресурса бандажей колесных пар локомотивов с использованием полиномиальной регрессии // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 3. С. 35-38.

05.02.02

О.А. Кулаков

НП «Камазавтоспорт»,
г. Набережные Челны, oleg.kulakov@kamaz.ru

ОБОСНОВАНИЕ НОВОЙ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-25-27

В работе обосновывается использование в качестве структурного параметра прецессии оси вторичного вала при изнашивании опорных подшипников коробки перемены передач при бортовом диагностировании.

Ключевые слова: первичный вал, вторичный вал, опорные подшипники, изнашивание, прецессия, новый структурный параметр, диагностирование.

Как показывает практика эксплуатации автомобилей КамАЗ, средний ресурс коробки передач существенно ниже заявленного. Это обусловлено в основном отказами вторичного вала, картера, подшипников, первичного вала, синхронизаторов [1]. Наиболее изнашиваемыми сопряжениями коробки передач (КП) являются сопряжения наружных обойм подшипников первичного и вторичного валов с картером коробки. В исходном состоянии эти сопряжения неподвижны. При определенной степени разрушения поверхности посадочных отверстий картера теряется неподвижность сопряжения и наблюдается уже трение скольжения со смазкой. После потери неподвижности сопряжения интенсивно возрастают радиальные зазоры валов, что существенно нарушает условия зацепления зубьев шестерен, переключения передач. Возрастает интенсивность повышения угловых зазоров за счет изнашивания элементов шлицевых сопряжений. Повышение угловых зазоров в свою очередь интенсифицирует рост осевых зазоров. В этом проявляется взаимное влияние технического состояния элементов коробки передач в процессе эксплуатации. Сопряжения трансмиссии являются динамически нагруженными, и возрастание зазоров в них происходит по экспоненциальной зависимости [2, 3].

Были проведены исследования на снятых после эксплуатации коробок передач автомобиля КАМАЗ (КП) [4,5], включающие полную разборку КП, микрометрич. деталей (картер, вторичный вал, первичный вал, синхронизатор 4-5 передач), анализ состояния рабочих поверхностей деталей, а также предремонтное диагностирование по выбранным параметрам.

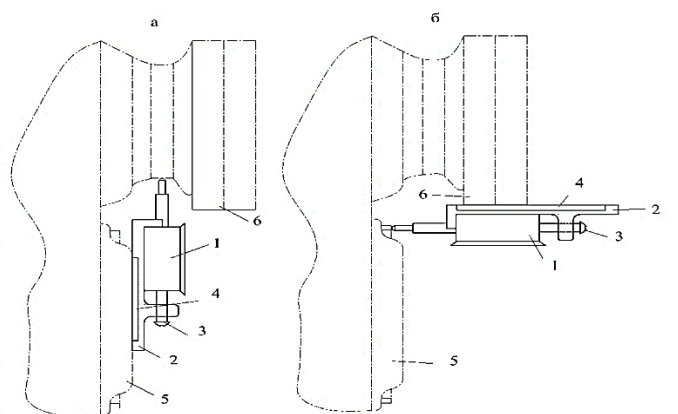


Рис. 1. - Схемы измерения радиального (а) и осевого (б) зазоров фланца вторичного вала КП автомобиля КамАЗ:

1 – индикатор часового типа; 2 – кронштейн; 3 – винтовое крепление индикатора; 4 – магнит;
5 – крышка роликового подшипника КП; 6 – фланец вторичного вала КП.

В качестве диагностических параметров коробки передач приняты: угловой зазор (люфт) фланца вторичного вала на каждой передаче, осевой зазор фланца и радиальный зазор [6]. Измерения осевых и радиальных зазоров фланца вторичного вала КП производили индикаторами часового типа (точность 0,1 мм), устанавливаемых в кронштейны с магнитным креплением (рис. 1). Собранные статистические данные по износу деталей и диагностическим параметрам коробок передач позволили определить параметры зависимости диагностических параметров от структурных [7], которые приведены в табл. 1.

Таблица 1. - Параметры зависимости диагностических параметров S от структурных x

Диагностические и структурные параметры	a	b	r^2
Зависимость углового зазора фланца вторичного вала (мин) от суммарного износа (мм) шлицев вторичного вала и синхронизатора 4-5 передач	46,5	12,6	0,99
Зависимость осевого зазора фланца вторичного вала (мкм) от торцевого биения вала (мкм)	28,69	1,309	0,98
Зависимость радиального зазора фланца вторичного вала (мкм) от износа отверстий картера (мкм)	38,59	0,506	0,982

Примечание к табл. 1: a , b - параметры линейной зависимости диагностического параметра S от структурного x ; $S = a + bx$; r^2 - коэффициент корреляции.

Полученные зависимости свидетельствуют об однозначности, и даже линейности связи диагностических и структурных параметров. Диагностические параметры отвечают основным требованиям.

Анализ приведенных данных по изнашиванию и взаимному влиянию элементов коробки перемены передач и способа предремонтного диагностирования привел к выводу о том, что основными признаками неисправности являются радиальные зазоры и динамические нагрузки [8]. Одним из важнейших параметров, определяющих виброактивность подшипников качения, является величина радиального зазора. Повышение нагрузки на первичный вал коробки передач вследствие образования дисбаланса сцепления [9], возникающего вследствие нарушения центрирования среднего ведущего диска, также способствует скорому выходу из строя опорного подшипника первичного вала, установленного в заднем торце коленчатого вала.

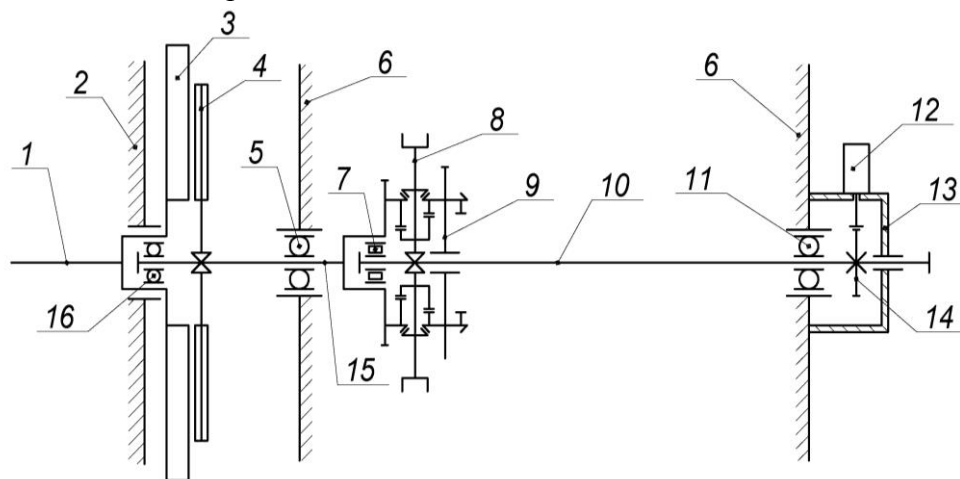


Рис. 2. - Кинематическая схема валов и опор КП:

- 1 – коленчатый вал; 2 – блок цилиндров; 3 – маховик; 4 – узел сцепления;
- 5, 7, 11, 16 – подшипник; 6 – картер коробки передач; 8 – синхронизатор IV-V передач;
- 9 – шестерня IV передачи; 10 – вторичный вал коробки передач;
- 12 – индуктивный датчик положения; 13 – крышка заднего подшипника вторичного вала;
- 14 – червяк привода спидометра; 15 – первичный вал коробки передач.

Установлено, что разрушение опорного подшипника первичного вала коробки передач, установленного в заднем торце коленчатого вала, приводит к тому, что первичный вал коробки передач теряет переднюю опору в пределах диаметра шариков. Этот консольный конец воспринимает динамические нагрузки от дисбаланса сцепления, за счёт чего появляется отклонение оси вращения первичного вала коробки передач в пределах этого зазора, что является причиной прецессии вала и вызывает повышение амплитуды динамических нагрузок, которые передаются посредством кинематических связей на вторичный вал. Наряду с этим происходит прецессия вторичного вала. Вращение – это угловое движение вала вокруг своего геометрического центра с или оси вала без перемещения и вибрации этого центра. Прецессия – это перемещение, или вибрация, геометрического центра вала в плоскости, которая перпендикулярна оси вала.

Разработано устройство непрерывного диагностирования технического состояния опорных подшипников первичного и вторичного валов коробки передач КАМАЗ в эксплуатации, представляющего собой смонтированный в крышку заднего подшипника индуктивный датчик положения, сигнал которого от начального радиального биения возрастает вследствие образования прецессии оси вторичного вала, вызванной переломом общей оси валов при изнашивании подшипников. Отклонение сигнала от номинального значения свидетельствует о повышенной амплитуде биения вторичного вала коробки передач вследствие образования прецессии оси вала из-за неисправности хотя бы одного опорного подшипника первичного и вторичного валов коробки передач.

Прецессия конца вторичного вала представляется, таким образом, структурным параметром, который очень информативен и может контролироваться непрерывно при работе силового агрегата. Это дает возможность применить его в бортовой диагностике износа деталей коробки передач, в частности износа опорных подшипников, поддерживающих во вращении первичный и вторичный валы коробки передач КАМАЗ.

Список литературы

1. Азаматов Р.А. Восстановление деталей автомобилей КамАЗ / В.Г. Дажин, А.Т. Кулаков, А.И. Модин. – Набережные Челны: КамАЗ, 1994. - 215с.
2. Авдонькин Ф.Н. Изменение технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации. – Саратов, Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1973. – 191 с.
3. Устройство и техническое обслуживание автомобилей КамАЗ. М. / Э.В. Унгер, В.И. Левин, С.Я. Этманов, И.М. Машетин. – М.: «Транспорт», 1976. - 392 с.
4. Туркеев Г.Г. Анализ способов восстановления вторичного вала коробки передач автомобиля КамАЗ // Совершенствование технологий и организация работоспособности машин. Межвуз. Науч. сб. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. С.100-102.
5. Туркеев Г.Г. Аналитические предпосылки изменения технического состояния коробки передач в процессе эксплуатации / А.С. Денисов, Г.Г. Туркеев // Матер. Междунар. науч.-практ. конф., посв. 70-летию со дня рождения профессора А.Г. Рыбалко, 11-12 июля, Саратов: Саратов. гос. аграр. ун-т, ч. III, 2006. - С.19-25.
6. Мирошников Л.В., Болдин А.П., Пал В.И. Диагностирование технического состояния автомобилей на автотранспортных предприятиях. – М.; Транспорт, 1977. – 263 с.
7. Денисов А.С. Основы формирования эксплуатационно-ремонтного цикла автомобилей. - Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1999. – 352 с.
8. Кулаков, А.Т. Восстановление работоспособности сцеплений грузовых автомобилей усовершенствованным ремонтным комплектом/ А.Т. Кулаков, С.Ю. Коваленко, Ш.С. Хуснетдинов // Вестник Оренбургского государственного университета № 12, 2013. - С. 233-240.
9. Хуснетдинов, Ш.С. Диагностирование сцепления автомобиля по показателям вибрации силового агрегата / Ш.С. Хуснетдинов, Е.А. Пеньков, Р.И. Гарипов // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2014. - № 10. - С. 146-151.

05.02.00

Ю.И. Лесникова, О.Ю. Сметанников, А.Н. Труфанов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, ant@pstu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕРМОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО В ПОЛИМЕРНОМ ЗАЩИТНО-УПРОЧНЯЮЩЕМ ПОКРЫТИИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-28-31

Построена математическая модель эволюции напряженно деформированного состояния в анизотропном оптическом волокне типа «Panda» в условиях контактного термосилового нагружения. Установлено, что поля напряжений сформированные при силовой намотке в большей части релаксируют при нагреве и выдержке на первом цикле изменения температуры. Уровень напряжений на втором цикле отличается от первого незначительно, менее чем на 1,5%.

Ключевые слова: анизотропное волокно, полимерное покрытие, контактное воздействие, релаксация.

В качестве чувствительных элементов многих современных высокотехнологичных датчиков используются специальные типы оптических волокон, изготовленных из легированных кварцевых стекол [1]. Для защиты световода, от внешней среды и механических воздействий, как правило, используют УФ-отверждаемые полимерные покрытия. Один из вариантов исполнения такого защитно-упрочняющего покрытия (ЗУП) представляет из себя два слоя полимера. Внутренний слой при комнатной температуре находится в высокоэластическом релаксационном состоянии, его задача уменьшить влияние силовых воздействий (изгиб, поперечная сила и др.) на оптоволокно. В свою очередь для защиты относительно мягкого, эластичного первичного покрытия от механического воздействия и влияния внешней среды используют второй слой покрытия, который при комнатной температуре находится в застеклованном состоянии.

Использование специальных оптических волокон в составе различных высокоответственных комплексов, таких, например, как система навигации на основе оптоволоконных гироскопов, системы мониторинга состояния строительных конструкций и др., накладывает жесткие требования к корректной работе изделий в заданных условиях эксплуатации диапазоне температур. Изменение температуры из-за неоднородности конструкции самого анизотропного волокна, существенного отличия КЛТР материалов ЗУП и кварцевого стекла влечет за собой формирование полей деформаций, которые в силу известных фотоупругих эффектов оказывают влияние на оптические характеристики волокна. Кроме того нагрев или охлаждение существенно влияют и на реологические свойства защитных покрытий, и при достаточно широком эксплуатационном диапазоне температур в полимерах могут происходить релаксационные переходы, которые сопровождаются изменением податливости материала на несколько порядков, что в конечном счете тоже влияет на точность показаний приборов.

При изготовлении анизотропных волокон и приборов на их основе на разных этапах производства проводят промежуточные испытания изделий, подтверждающие соответствие контрольных параметров проектным величинам. Один из видов таких испытаний называется технологическая проба и заключается в измерении оптических характеристик волокна намотанного с натягом на катушку с нанесенным на ее поверхность поперечным дефектом (Рис.1).

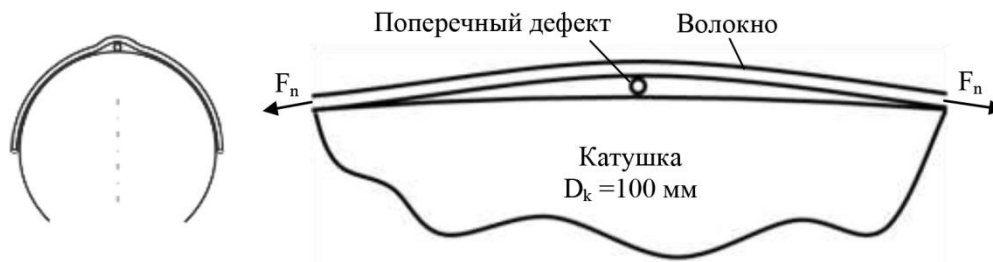


Рис.1 – Схема технологической пробы с микроизгибом через волокно, приклеенное вдоль образующей катушки

В работах [2,3] рассмотрено влияние силовой намотки на характеристики оптического волокна без учета ЗУП, а контактное взаимодействие световода с катушкой в целях упрощения не рассматривается. В работе [4] выполнен анализ с учетом контакта и ЗУП при комнатной температуре. Целью данной работы является построение математических моделей, позволяющих установить закономерности эволюции технологических напряжений и оптических характеристик в анизотропных волокнах с учетом всех перечисленных выше факторов, в том числе, релаксационных процессов протекающих в полимерных покрытиях при циклическом изменении температуры по заданному закону в диапазоне от -60 до 60 °С.

Экспериментальные исследования вязкоупругих свойств материалов защитных покрытий показали, что исследуемый интервал изменения температуры частично пересекается с диапазонами релаксационных переходов в материалах ЗУП. При охлаждении до -60 °С внутренний слой покрытия находится в состоянии релаксационного перехода из высокоэластичного в застеклованное, а при высоких температурах во внешнем полимерном покрытии существенно увеличивается податливость, что связано с началом процессов размягчения.

В связи с тем, что изменение температуры в термоцикле происходит с небольшой скоростью, были приняты следующие гипотезы: изменение температуры происходит равномерно по всему объему волокна и катушки, градиенты температур малы и ими можно пренебречь, тогда постановка задачи включает в себя:

уравнения равновесия

$$\operatorname{div} \hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in V, \quad (1)$$

физические соотношения

$$\hat{s}(\mathbf{x}, t) = \int_0^t R_G(t - \tau) \frac{\partial \hat{e}(\mathbf{x}, \tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad \sigma(\mathbf{x}, t) = B\theta(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in V, \quad (2)$$

где $\sigma = \sigma_{kk}/3$ – шаровая часть тензора напряжений $\hat{\sigma}$, а $\hat{s} = \hat{\sigma} - \sigma \hat{E}$ его девиатор, $\theta = \varepsilon_{kk}$ – сумма объемной и температурной деформаций, $\hat{e} = \hat{\varepsilon} - \theta \hat{E}/3$ – девиатор тензора деформаций, $\hat{E}$ – единичный тензор второго ранга, $R_G(t)$ – функция сдвиговой релаксации материала. Предполагаем, что объемная релаксация в рассматриваемых материалах пренебрежимо мала.

Полимеры ЗУП являются термореологически простыми материалами, тогда в соответствии с принципом температурно временной аналогии можно записать аппроксимацию функции сдвиговой релаксации суммой экспонент вида:

$$R_G^{(m)}(t) = 2 \left[G_\infty^{(m)} + \left(G_0^{(m)} - G_\infty^{(m)} \right) \sum_{i=1}^{N^{(m)}} C_i^{(m)} e^{\left(\frac{t-\tau}{\beta_i^{(m)}} \right)} \right], \quad \mathbf{x} \in V_m, \quad m = \overline{1, 2}, \quad (3)$$

где $\overline{\beta_i^{(m)}} = \frac{\beta_i^{(m)}}{A_T(T, T_0)}$, $A(T, T_0)$ – функция сдвига Вильямса-Ланделла-Ферри [5]

определенная соотношением $\lg A_T = \frac{C_1^{(m)}(T - T_0^{(m)})}{C_2^{(m)} + (T - T_0^{(m)})}$; мгновенный и длительный модули

сдвига $G_0^{(m)}$, $G_\infty^{(m)}$, а также материальные константы C_1^m , C_2^m , T_0^m были установлены экспериментально для первичного ($m=1$) и вторичного ($m=2$) покрытий. Для кварцевого волокна ($m=3$) и алюминиевой катушки ($m=4$) $R_G^{(m)}(t) = 2G^{(m)}$, $\mathbf{x} \in V_m$.

Известно, что при изгибе тонких балок с прогибами до 30% их длины, с приемлемой точностью можно использовать гипотезу о малых деформациях [6]. В рассматриваемой задаче перемещения существенно ниже, поэтому были использованы геометрические соотношения Коши:

$$\hat{\varepsilon}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + (\nabla \mathbf{u}(\mathbf{x}, t))^T \right), \quad \mathbf{x} \in V, \quad (4)$$

В начальный момент времени полимерные покрытия и алюминиевая катушка находятся в естественном недеформированном состоянии,

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, 0) = \hat{\varepsilon}(\mathbf{x}, 0) = 0, \quad \mathbf{x} \in V_1, V_2, V_3 \quad (5)$$

а в анизотропном оптическом волокне сформированы поля остаточных напряжений, обусловленные их конструкцией и технологией производства

$$\hat{\sigma}(\mathbf{x}, 0) = \hat{\sigma}_0(\mathbf{x}, 0), \quad \mathbf{x} \in V_4. \quad (6)$$

Методика вычисления остаточных напряжений $\sigma_0(\mathbf{x}, 0)$ дана в работе [7].

Статические граничные условия

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{U}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in S_u, \quad \hat{\sigma}(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} = \mathbf{p}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in S_p, \quad (7)$$

Ввиду симметрии рассматриваемой конструкции с целью экономии вычислительных ресурсов рассматривалась ее четверть. Заменив отбрасываемые части соответствующими граничными условиями:

$$u_z = 0, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1, \quad u_x = 0, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_2, \quad (8)$$

На общей поверхности контакта S_K с условными номерами 1 и 2 должны быть выполнены силовые условия сопряжения:

$$\hat{\sigma}_1(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n} = \hat{\sigma}_2(\mathbf{x}, t) \cdot \mathbf{n}, \quad \mathbf{x} \in S_K, \quad (9)$$

и условия взаимного непроникновения тел

$$\left((\mathbf{x} + \mathbf{u})_{(1)} - (\mathbf{x} + \mathbf{u})_{(2)} \right) \cdot \mathbf{n} \leq 0, \quad \mathbf{x} \in S_K \quad (10)$$

Численная реализация описанной математической модели была выполнена с использованием возможностей конечно-элементного пакета ANSYS, в котором для описания вязкоупругого поведения материала была использована обобщенная модель Максвелла с аппроксимацией функции сдвиговой релаксации суммой экспонент вида (3). Для решения задачи использовался метод пошагового интегрирования [8], для чего в рассмотрение вводилась неравномерная сетка по времени, на каждом шаге которой выполнялась линеаризация системы алгебраических уравнений методом Ньютона-Рафсона и решалась краевая задача линейной теории упругости с некоторым начальным полем остаточных напряжений, определяемым на предыдущем временном слое. На рис.2. приведены характерные результаты численного эксперимента.

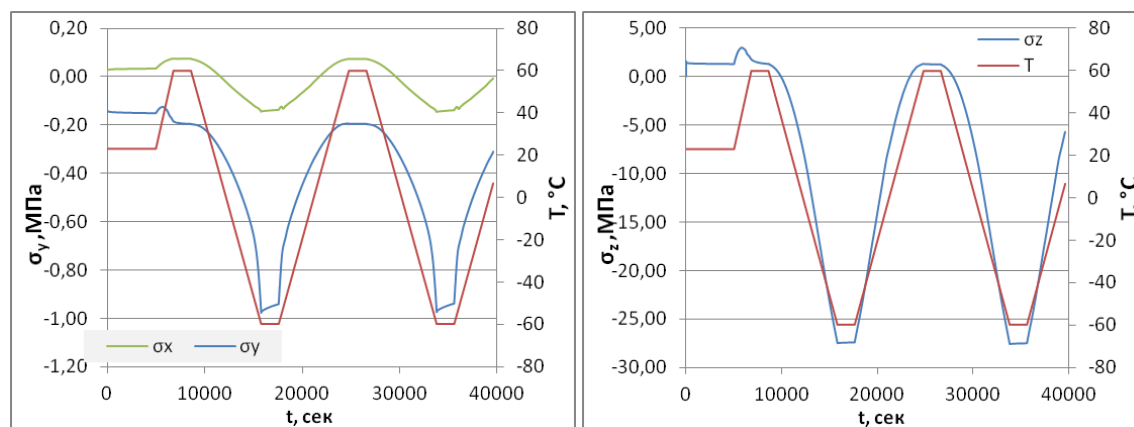


Рис.2 – Эволюция компонент тензора напряжений в середине светопроводящей жилы над дефектом при циклическом изменении температуры

Таким образом, построена математическая модель и выполнена ее численная реализация, влияния термосилового нагружения анизотропного оптического волокна типа Panda, с учетом контактного взаимодействия с катушкой, микроизгиба и реологических свойств защитно-упрочняющих покрытий. В результате численных экспериментов установлено, что напряжения вызванные силовой намоткой в большей степени релаксируют при нагреве и выдержке уже на первом цикле изменения температуры, и далее практически не отличаются от соответствующих значений на последующих циклах. Так $\sigma_z^{(1)}$ на первом цикле в центре светопроводящей жилы непосредственно над дефектом при температуре 60°C отличается только на 1,5% от соответствующего $\sigma_z^{(2)}$ при той же температуре на втором цикле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-48-590660 p_a).

Список литературы

1. B. Lee, Review of the present status of optical fiber sensors, Opt. Fiber Technol. 9 (2003) 57–79. doi:10.1016/S1068-5200(02)00527-8.
2. R. Ulrich, S. Rashleigh, Polarization coupling in kinked single-mode fibers, IEEE J. Quantum Electron. 18 (1982) 2032–2039.
3. K. Bløtekjær, Strain distribution and optical propagation in tension-coiled fibers, Opt. Lett. 18 (1993) 1059. doi:10.1364/OL.18.001059.
4. Lesnikova Y. I. et al. Contact stresses modeling at the Panda-type fiber single-layer winding and evaluation of their impact on the fiber optic properties //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2017. – Т. 177. – №. 1. – С. 012116.
5. M.L. Williams, R.F. Landel, and J.D. Ferry. "The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids". Journal of the American Chemical Society. Vol. 77. 3701-3706. 1955.
6. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. – М.: Физматгиз., 1962. - 456 с.
7. A.N. Trufanov, N.A. Trufanov, N. V. Semenov, Numerical analysis of residual stresses in preforms of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers in view of technological imperfections of the doped zone geometry, 31 (2016) 83–91. doi:10.1016/j.yofte.2016.06.004.
8. Адамов А.А., Матвеев В.П., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Методы прикладной вязкоупругости. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. - 411 с.

05.02.02

В.П. Новоселов, М.Д. Лукашук, К.Н. ПестовФГАОУ ВО Уральский федеральный университет им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина,Институт новых материалов и технологий, кафедра деталей машин,
Екатеринбург, ptmir@inbox.ru, 0606.98@mail.ru, k.n.pestov@urfu.ru**ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВОГО МЕХАНИЗМА ПРИВОДА СТАНА
ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ****DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-32-34**

В работе представлена динамическая модель привода стана холодной прокатки труб (ХПТ) с оригинальной конструкцией механизма вращения прокатных валков, а также система дифференциальных уравнений, описывающая поведение исследуемой модели. Дано обоснование результатов выполненного динамического анализа, оценка эффективности и перспектив внедрения новой конструкции.

Ключевые слова: *прокатный стан, динамическая модель, дифференциальные уравнения.*

Производительность и эффективность использования станов ХПТ традиционной конструкции ограничена высокими динамическими нагрузками, возникающими при скоростном возвратно-поступательном движении массивной прокатной клетки, а также технологическим усилием прокатки встречного продольного направления, создающим значительное дополнительное сопротивление движению клетки [1].

В Уральском федеральном университете разработана прокатная клетка с оригинальным приводом прокатных валков [2], формирующим рациональный режим обжатия металла в очаге деформации и, как следствие, в 2-3 раза снижающим продольное усилие прокатки [3] и пропорционально уменьшающим рабочие нагрузки в шатунной линии. Полученный эффект открывает возможность создания более рациональных, облегченных конструкций всех узлов линии привода стана, а также значительного снижения технологических, динамических нагрузок и энергозатрат технологического процесса [4]. Необходимым условием перспективного проектирования новой конструкции линии привода прокатных станов является предварительное теоретическое исследование динамики таких механизмов.

Механизм главного привода станов ХПТ относится к разряду цикловых механизмов, отличительной особенностью которых является переменность первой передаточной функции ведомого звена (функции положения). При этом функция положения нелинейна. При динамическом исследовании специфика цикловых механизмов проявляется в более сложном характере динамических связей из-за переменности параметров системы и кинематических нелинейностей. Соответственно возникают и качественно более сложные динамические эффекты.

Во многих задачах динамики цикловых механизмов выражение кинематической и потенциальной энергий через независимые обобщенные координаты приводит к сложным функциональным связям. Этот недостаток присущ как методу Даламбера, так и методу, использующему уравнение Лагранжа в его обычной форме. По этой причине целесообразным является применение особой формы уравнений Лагранжа с «лишними» координатами [5].

Рассматриваемый механизм и соответствующая ему динамическая модель (рис. 1) – система голономная. Для голономных систем уравнение Лагранжа в особой форме лишними координатами имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{g}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial g_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial g_j} = Q_j + \sum_{i=1}^n \Lambda_i h_{ij}; \quad j = (1, 2, 3, \dots, H + n), \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы, выраженная через обобщенные координаты; Π – потенциальная энергия системы; Q_j – обобщенные силы; L_i – множитель Лагранжа; h_{ij} – коэффициенты при множителях Лагранжа; H – число обобщенных координат системы; n – число «лишних» координат; g_j – обобщенные координаты: g_1 – координата положения ротора двигателя, g_2 – упругая деформация кинематической цепи ротор – кривошип, g_3 – упругая деформация шатунной линии, g_4 – функция положения механизма (принята в качестве «лишней» координаты).

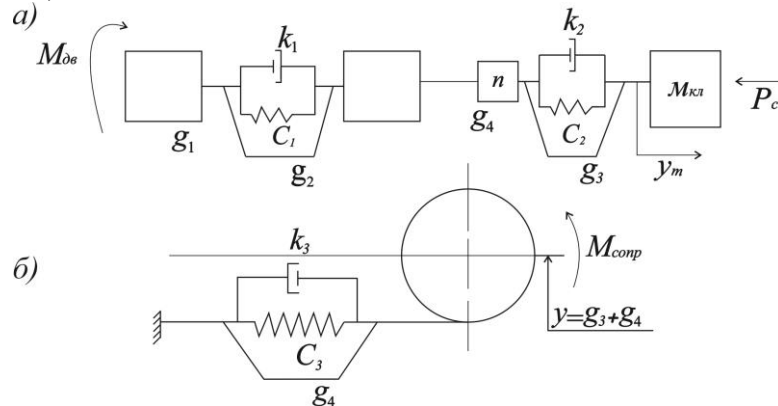


Рис. 1 – Динамическая модель механизма:

а) – линия главного привода, б) – линия привода прокатных валков

Таким образом, число степеней свободы системы $H=3$, число «лишних» координат $n=1$. Лишние неизвестные не являются независимыми, поэтому в дополнение к (1) вводим n уравнений связи вида

$$\sum_{j=1}^{H+n} h_{ij} g_j + h_i = 0; \quad (i=1, 2, 3, \dots, n). \quad (2)$$

Вводя в уравнение (1) выражение потенциальной и кинетической энергии в развернутом виде, дифференцируя и исключая множители Лагранжа получаем систему $H+n$ дифференциальных уравнений в общем виде. Определяя для исследуемого механизма коэффициенты при обобщенных координатах и их производных и выражения для обобщенных сил, получаем следующую систему:

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ I_1 + I_2 + m_{\kappa\lambda} \left[\Pi'(g_1 + g_2) \right]^2 \right\} \ddot{g}_1 + \left\{ I_2 + m_{\kappa\lambda} \left[\Pi'(g_1 + g_2) \right]^2 \right\} \ddot{g}_2 + \\ & + m_{\kappa\lambda} \Pi'(g_1 + g_2) \ddot{g}_3 + m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) \Pi'(g_1 + g_2) \dot{g}_1^2 + \\ & + m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) \Pi'(g_1 + g_2) 2 \dot{g}_1 \dot{g}_2 + m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) \times \\ & \times \Pi'(g_1 + g_2) \dot{g}_2^2 = M_{\delta\delta} - P_c \Pi'(g_1 + g_2); \\ & \left\{ I_2 + m_{\kappa\lambda} \left[\Pi'(g_1 + g_2) \right]^2 \right\} \ddot{g}_1 + \left\{ I_2 + m_{\kappa\lambda} \left[\Pi'(g_1 + g_2) \right]^2 \right\} \ddot{g}_2 + m_{\kappa\lambda} \Pi'(g_1 + g_2) \ddot{g}_3 + \\ & + m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) \Pi'(g_1 + g_2) \dot{g}_1^2 + m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) \Pi'(g_1 + g_2) 2 \dot{g}_1 \dot{g}_2 + \\ & + m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) \Pi'(g_1 + g_2) \dot{g}_2^2 + c_1 g_2 = -k_2 \dot{g}_2 - P_c \Pi'(g_1 + g_2); \\ & m_{\kappa\lambda} \Pi'(g_1 + g_2) \ddot{g}_1 + m_{\kappa\lambda} \Pi'(g_1 + g_2) \ddot{g}_2 + m_{\kappa\lambda} \ddot{g}_3 + \\ & + m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) \dot{g}_1^2 + m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) 2 \dot{g}_1 \dot{g}_2 + \\ & m_{\kappa\lambda} \Pi''(g_1 + g_2) \dot{g}_2^2 + c_2 \dot{g}_3 = -k_2 \dot{g}_3 - P_c \end{aligned} \right\}$$

где I_1 – момент инерции двигателя; I_2 – момент инерции кривошипа; $m_{кл}$ – масса прокатной клетки; $M_{дв}$ – момент двигателя; P_c – сила технологического сопротивления; C – коэффициент жесткости упругой связи; k – коэффициент диссипации.

С учетом момента на валке, создаваемого упругой связью, момента сил технологического сопротивления [2], момента диссипативных сил дифференциальное уравнение вращательного движения прокатного валка имеет вид:

$$I_{g_5} \ddot{g}_5 = \left\{ P_0 + \frac{EF \left[Y - \left(\frac{g_5 + \beta_1}{\beta_2} \sqrt{\rho^2 + (\rho')^2} dg_5 - (l_2 - l_1) \right) \right]}{k \left(\frac{g_5 + \beta_1}{\beta_2} \sqrt{\rho^2 + (\rho')^2} dg_5 \right)} \right\} \rho_k -$$

$$- \left\{ P_0 + \frac{EF \left[- \left(\frac{g_5 + \beta_1}{\beta_2} \sqrt{\rho^2 + (\rho')^2} dg_5 - (l_2 - l_1) \right) - Y \right]}{k \left(l_0 + \frac{g_5 + \beta_1}{\beta_2} \sqrt{\rho^2 + (\rho')^2} dg_5 \right)} \right\} \rho_k -$$

$$- Q \rho_k + P \eta_3 \sqrt{2 \Delta t \rho_k} - 2 k_4 t \frac{d}{dt} \left[Y - \left(\frac{g_5 + \beta_1}{\beta_2} \sqrt{\rho^2 + (\rho')^2} dg_5 - (l_2 - l_1) \right) \right] \rho_k,$$

где F – площадь сечения упругого элемента; l_0 – начальная свободная длина упругой связи; ρ_k – катающий радиус калибров; β_1, β_2 – углы с вертикалью радиуса шкива, проведенного в точку сбег упругого элемента; Y – перемещение шкива вместе с клетью; l_1, l_2 – длина упругой связи, отсекаемая вертикальной осью шкива; k – коэффициент эффективной длины упругой связи; g_5 – угловое ускорение валка; Q – осевое усилие прокатки; Δt – сжатие стенки заготовки; η_3 – коэффициент. Объединяя уравнения, получаем полную систему уравнений, описывающую поведение исследуемого механизма, предоставляющую собой алгоритм решения задачи.

На основании выполненного теоретического исследования динамических процессов в цикловом механизме линии главного привода и привода прокатных валков в их взаимосвязи, а также анализа влияния осевых усилий прокатки на технологические и динамические нагрузки установлено трехкратное снижение динамических нагрузок в линии привода прокатных валков, а также полутора-двукратное снижение общего уровня динамичности в линии главного привода. Достигнутое снижение динамических и технологических нагрузок обусловило уменьшение на величину до 28% пиковых усилий в линии главного привода и понижение на величину до 20% эквивалентной мощности, потребляемой приводным двигателем. Достигаемый при использовании новой конструкции прокатной клетки невысокий уровень динамичности механической системы позволяет существенно увеличить ее быстродействие, что может быть положено в основу создания быстроходных отечественных станов, не уступающих по производительности лучшим зарубежным аналогам.

Список литературы

1. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке: М., Машиностроение, 1983, с.74-83.
2. Соколовский В.И., Фотов А.А., Вердеревский В.А., Новоселов В.П., Рабочая клеть стана холодной прокатки труб. А.с. 876219 (СССР): Б.И. 1981, №40, с.25.
3. Новоселов В.П., Вязкова Л.П., Кузнецов В.И. Опытнo-промышленные испытания новой рабочей клетки стана холодной прокатки труб: Екатеринбург, Теория машин металлургического оборудования. Межвузовский сборник, 2015, с.139-143.
4. Чечулин Ю.Б., Новоселов В.П. Комплексная модернизация стана периодической холодной прокатки труб и его исследование: Екатеринбург, Теория машин металлургического оборудования. Межвузовский сборник, 2016, с.14-19.
5. Вульфсон И.И., Динамические расчеты цикловых механизмов: М., Наука, 1976, с.187-231.

05.02.08

И.С. Цихалевский к.т.н., А.П. Буйносов д.т.н.

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НЕПОДРЕССОРЕННОЙ МАССЫ, ПРИХОДЯЩЕЙСЯ НА ОДНО КОЛЕСО ЭЛЕКТРОВОЗА ПРИ НАЕЗДЕ НА НЕРОВНОСТЬ ПУТИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-35-38

В статье приводятся основные уравнения для расчета ускорения перемещения неподрессоренной массы электровоза, приходящейся на одно колесо колесной пары электровоза при наезде на прямоугольную неровность пути.

Ключевые слова: электровоз, масса, колесо, перемещение, путь, неровность, ускорение, определение.

Взаимодействие электровоза и пути во многом определяет безопасность движения, надежность работы и прочность узлов механической части и электровоза в целом. От уровня этого взаимодействия зависят конструкционная скорость, плавность хода электроподвижного состава и комфорт пассажиров. Силы взаимодействия электровоза и пути разделяются на статические, к которым относятся сила тяжести электровоза, сила тяги и торможения, динамические силы, обусловленные массой и ускорениями при колебаниях электровоза [1].

Основной причиной колебаний неподрессоренных и поддрессоренных частей локомотива являются неровности пути: местные выпучивания и просадки, носящий случайный характер [2], знакопеременные, вызванные рельсовыми стыками и волнообразным износом рельсов. Случайные неровности пути вызывают собственные колебания, частоты которых определяются массой надрессорного строения и жесткостью рессор. Закономерно меняющиеся неровности пути, как и перечисленные дефекты колес, приводят к образованию возмущающих сил, поддерживающих вынужденные колебания и носят устойчивый характер [3].

Неподдрессоренные части электровозов испытывают наибольшее воздействие со стороны пути. Возникающие при наезде на неровности динамические нагрузки, обусловленные вертикальными ускорениями, могут быть опасными для узлов механической части электровоза и пути [4].

Рассмотрим простейший случай наезда колеса и связанной с ним необдрессоренной массы на прямоугольную неровность (см. рисунок). Можно предположить, что в реальных условиях это соответствует перекатыванию колеса с одной рельсовой плети на другую в зоне стыка. Аналогичные явления происходят также при наличии ползуна на рабочей поверхности бандажа.

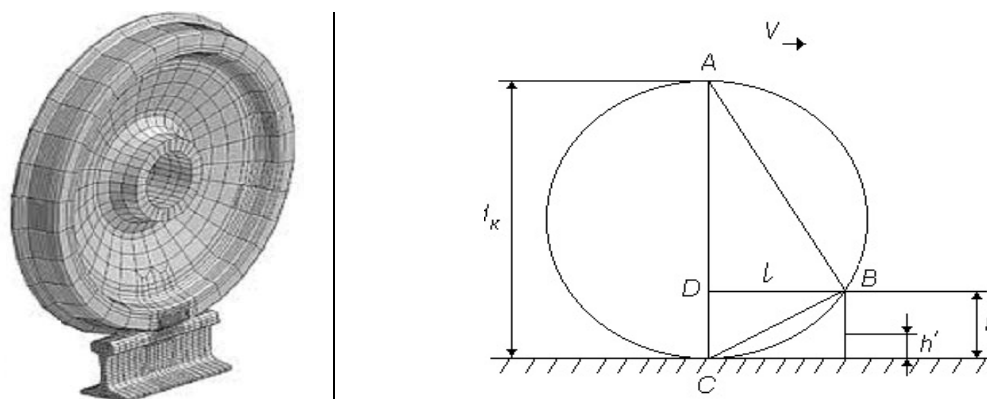


Рис. Наезд колеса на прямоугольную неровность пути

Если колесо с диаметром d_k , относящее на расстоянии l от начала неровности с высотой h , движется со скоростью движения V , время его подъема будет равно

$$t = \frac{l}{V} \quad (1)$$

Из подобия треугольников ABD и DBC следует

$$\frac{|AD|}{|BD|} = \frac{|BD|}{|DC|}, \quad (2)$$

то есть

$$\frac{d_k - h}{l} = \frac{l}{h} \quad (3)$$

Отсюда

$$l^2 = (d_k - h) \cdot h. \quad (4)$$

Принимая во внимание, что $d_k \gg h$, с достаточной точностью можно написать

$$l^2 = d_k \cdot h. \quad (5)$$

Следовательно, время подъема колеса на неровность

$$t = \frac{\sqrt{d_k \cdot h}}{V}. \quad (6)$$

При наезде колеса на неровность происходит упругая посадка пути, вследствие чего колесо поднимается на высоту h' , меньшую чем h . Исследования показывают, что в процессе наезда на неровности характер изменения вертикальных ускорений и максимальные их значения зависят от множества факторов, основными из которых являются скорость движения, масса необрессоренных частей и жесткость рессорного подвешивания электровоза, жесткость верхнего строения пути. С целью упрощения предположим, что подъем колеса на прямоугольную неровность происходит с постоянным ускорением, т.е. $\ddot{z}_k = \text{Const}$.

Тогда

$$h' = \frac{\ddot{z}_k \cdot t^2}{2}. \quad (7)$$

Подставив значение t , получим

$$\ddot{z}_k = \frac{2 \cdot h'}{t^2} = \frac{2 \cdot h' \cdot V^2}{d_k \cdot h} \quad (8)$$

Таким образом, динамическая нагрузка ΔP_1 непрорессоренной массы m , приходящейся на одно колесо, будет равно

$$\Delta P_1 = m \cdot \ddot{z}_{kk} = m \cdot \frac{2 \cdot V^2 \cdot h'}{d_k \cdot h} \quad (9)$$

В реальных условиях эксплуатации электровозов время наезда на неровность весьма мало, поэтому при наличии рессор наддресорное строение, сохраняя свое горизонтальное положение, не успевает переместиться в вертикальном направлении. Поэтому уместно предположить, что при подъеме колеса рессора подвергается дополнительному прогибу на величину h' , и это вызовет дополнительную динамическую нагрузку ΔP_2

$$\Delta P_2 = j \cdot h', \quad (10)$$

где j – жесткость рессоры или комплекта рессор одного колеса.

Тогда суммарная динамическая нагрузка от колеса на рельс составит

$$\Delta P_d = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (11)$$

Анализ полученных уравнений показывает, что динамическая нагрузка ΔP_1 , обусловленная вертикальным ускорением колеса, резко возрастает с увеличением скорости движения V электровоза. При большой скорости движения интенсивность роста ΔP_1 несколько снижается из-за увеличения просадки пути, т.е. уменьшения h' . Динамическая нагрузка ΔP_2 с увеличением скорости движения V уменьшается пропорционально h' .

При жестком пути, когда его прогиб равен или близок к нулю и отсутствии упругости в элементах колесной пары, траектория движения неподрессоренной массы электровоза будет совпадать с очертаниями неровности пути. Если для описания неровности выбрать уравнение [5], взяв первую производную этого уравнения по времени, можно найти скорость $\dot{z}_k$ вертикального перемещения неподрессоренной массы одного колеса, т. е.

$$\dot{z}_p = \dot{z}_k = b \cdot w \cdot \cos wt . \quad (11)$$

Для определения ускорения $\ddot{z}_k$ вертикального перемещения колеса достаточно взять вторую производную

$$\ddot{z}_p = \ddot{z}_k = -b \cdot w^2 \cdot \sin wt . \quad (12)$$

Аналогично можно поступить при использовании уравнения [5]. Первая его производная дает

$$\dot{z}_p = \dot{z}_k = b \cdot w \cdot \sin wt . \quad (13)$$

Ускорение вертикального перемещения

$$\ddot{z}_p = \ddot{z}_k = b \cdot w^2 \cdot \cos wt . \quad (14)$$

При наезде на неровность упругого пути, что, несомненно, соответствует реальным условиям, происходит, как уже было отмечено, просадка пути и траектория движения неподрессоренной массы будет иная по сравнению с неровностями, описываемыми уравнениями (7) – (12) для ненагруженного пути. Следовательно, будут другими скорость и ускорение вертикального перемещения колеса. Величина просадки пути, амплитуда неровности, вертикальная скорость и ускорение теперь будет зависеть от упругости пути под неровностью и массы пути, совершающей вместе с колесом вертикальное перемещение.

Дифференциальное уравнение движения колеса с учетом упругости пути и инерции его верхнего строения

$$m \cdot \ddot{z}_k = (z_p - z_k) \cdot \mathcal{K}' + m' \cdot \ddot{z}_n , \quad (15)$$

где m' – масса верхнего строения пути, участвующая в вертикальном перемещении, отнесённая к одному рельсу; $\mathcal{K}'$ – жёсткость верхнего строения пути, отнесённая к одному рельсу; z_n – просадка пути, $z_n = z_p - z_k$; $m \cdot \ddot{z}_k$ – сила инерции массы одного колеса; $m' \cdot \ddot{z}_n$ – сила инерции массы верхнего строения пути, отнесённая к одному рельсу; $(z_p - z_k) \cdot \mathcal{K}'$ – реакция верхнего строения пути, обусловленная его прогибом на величину z_n .

Скорость вертикального перемещения колеса при движении по упругому пути, неровность которого описывается уравнением (5), будет равна

$$\dot{z}_k = k \cdot (B \cdot \cos kt - A \cdot \sin kt) - \frac{m' \cdot b \cdot w^2 - b \cdot \mathcal{K}'}{\mathcal{K}' - (m + m') \cdot w^2} \cdot w \cdot \sin wt \quad (16)$$

Следовательно, ускорение вертикального перемещения неподрессоренной массы, приходящейся на одно колесо, равно

$$\ddot{z}_k = -A \cdot k^2 \cdot \cos kt - B \cdot w^2 \cdot \cos wt \quad (17)$$

Составив дифференциальное уравнение движения колеса по неровности упругого пути, описываемой более точными уравнениями вида (6) и (7), и решив его можно также получить формулы для определения вертикального перемещения и ускорения колеса.

Список литературы

1. Буйносов А.П., Фетисова Н.Г. Наноматериал увеличивает ресурс бандажей колесных пар электроподвижного состава // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 2 (647). С. 59-64.
2. Буйносов А.П. Восстановление в депо изношенных бандажей промышленных электровозов с помощью наплавки без выкатки колесных пар // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 3. С. 04-11.
3. Буйносов А.П. Выбор остаточного проката бандажей при обточке колесных пар электровозов ВЛ11 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2013. Т. 6. № 2. С. 221-228.
4. Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Балдин В.Л. Математическая модель повышения ресурса бандажей колесных пар электровозов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. № 4. С. 43-48.
5. Буйносов А.П., Цихалевский И.С. Основные принципы расчета продольной развески тележки современного электроподвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 5. С. 65–68.

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

05.11.00

В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.В. Таланов

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Институт электроники и светотехники, кафедра электроники и электротехники,
Саранск, chembarova1@mail.ru, dubuch1995@mail.ru, mvtal@mail.ru

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБАСТНОЙ СИЛОВОЙ СХЕМЫ
ТРЕХУРОВНЕВОГО ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА
ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ 15 КВт****DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-39-41**

Выполнен анализ силовой схемы трехуровневого трехфазного инвертора. Проведено исследование робастности схемы при изменении: перегрузки, индуктивности входного синус фильтра, выходной нагрузки.

Ключевые слова: *робастность, инвертор, асинхронный двигатель, корректор коэффициента мощности.*

Важным критерием любой системы управления электроприводом является ее робастность. В статье приведено исследование трехуровневого трехфазного инвертора при перегрузке электродвигателя в 1,5 раза, при изменении индуктивности входного синус фильтра, при изменении выходной нагрузки. Исследование особенностей работы силовой схемы трехуровневого трехфазного инвертора проводилось на его модели (рисунок 1) в среде моделирования PSIM [1].

На входе схемы находится источник питания 750 В, которое подается на трехфазный трехуровневый инвертор, выполненный на IGBT транзисторах.

Преобразованное напряжение поступает на синус фильтр и затем на нагрузку [2]. Номинальное значение стабилизируемого линейного напряжения равно 380 В с частотой 50 Гц.

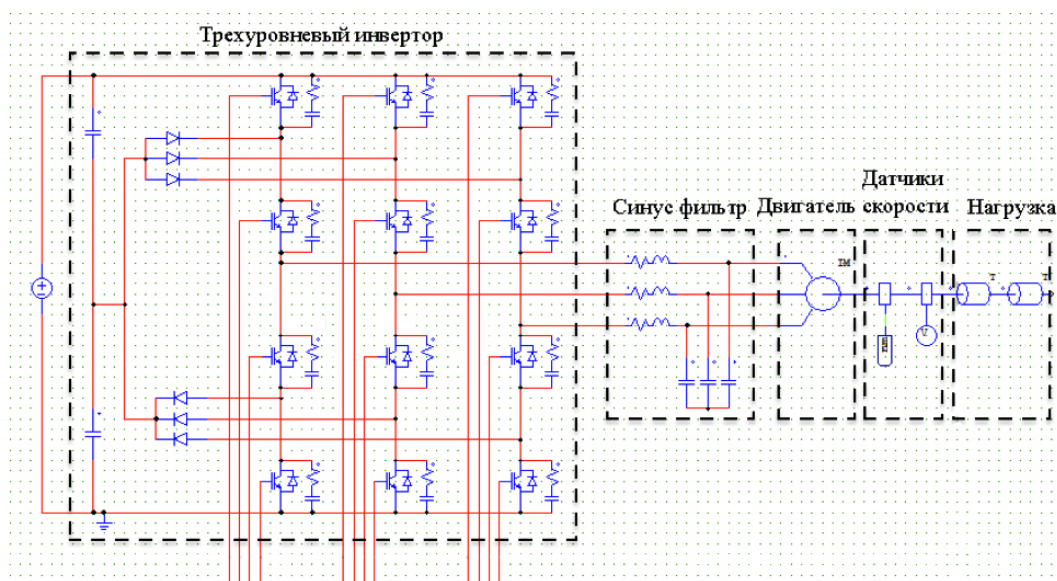


Рис. 1 – Модель трёхуровневого инвертора напряжения с обратной связью по датчику скорости на валу двигателя

Одной из основных нагрузок инвертора является трехфазный асинхронный двигатель – механическая нагрузка. Параметры модели асинхронного электродвигателя соответствуют характеристикам двигателя типа 4A200M6Y3 [3].

При исследовании функционирования схемы в номинальных режимах работы используются следующие величины: входное напряжение – 380 В; частота питающей сети – 50 Гц; выходное напряжение – 750 В; выходная нагрузка – 15 кВт; частота ШИМ – 10 кГц.

Из результатов моделирования выявлено, что активный выпрямитель функционирует верно, стабилизируя выходное напряжение 750 В, при этом уровень пульсаций составляет 3 В, что соответствует 0,4 %.

Амплитуда тока через транзистор составила 35 А, амплитуда тока обратного диода составила 41 А.

Активный выпрямитель работает в режиме корректора коэффициента мощности, поддерживая коэффициент мощности равный 0,9927, при этом коэффициент нелинейных искажений для тока составляет 0,12.

Далее было проведено исследование функционирования схемы при появлении 1,5-кратной перегрузки. На рисунке 2 представлены диаграммы работы активного выпрямителя при возникновении 1,5-кратной перегрузки.

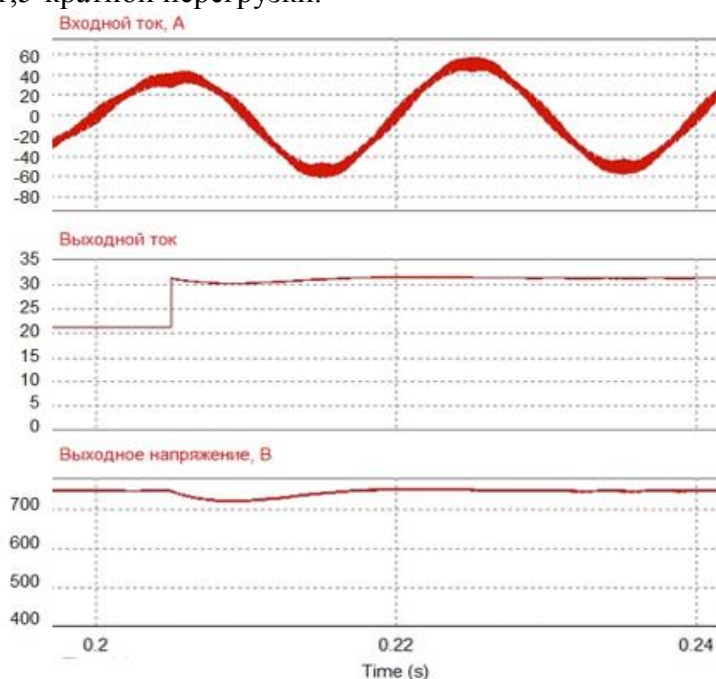


Рис. 2 – Диаграммы токов и напряжений при возникновении 1,5-кратной перегрузки

При 1,5-кратной перегрузке происходит небольшое снижение выходного напряжения до 728 В длительностью 0,1 с. Резких скачков входного тока не наблюдается.

Далее было проведено исследование функционирования схемы при изменении индуктивности синус фильтра.

На рисунке 3 представлены диаграммы работы выпрямителя с различными индуктивностями синус фильтра ($L = 400$ мкГн, $L = 600$ мкГн, $L = 900$ мкГн).

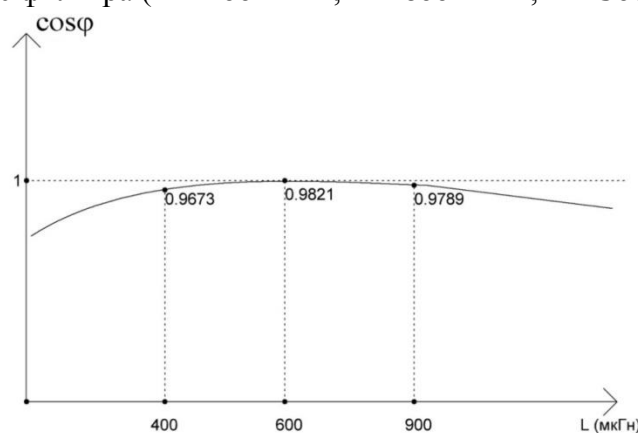


Рис. 3 – Зависимость $\cos\varphi$ при разных индуктивностях синус фильтра

Результаты моделирования показывают, что индуктивность входного дросселя является оптимальной [4].

Далее проведено исследование функционирования схемы при изменении выходной нагрузки.

На рисунке 4 представлены диаграммы работы выпрямителя с изменением выходной нагрузки.

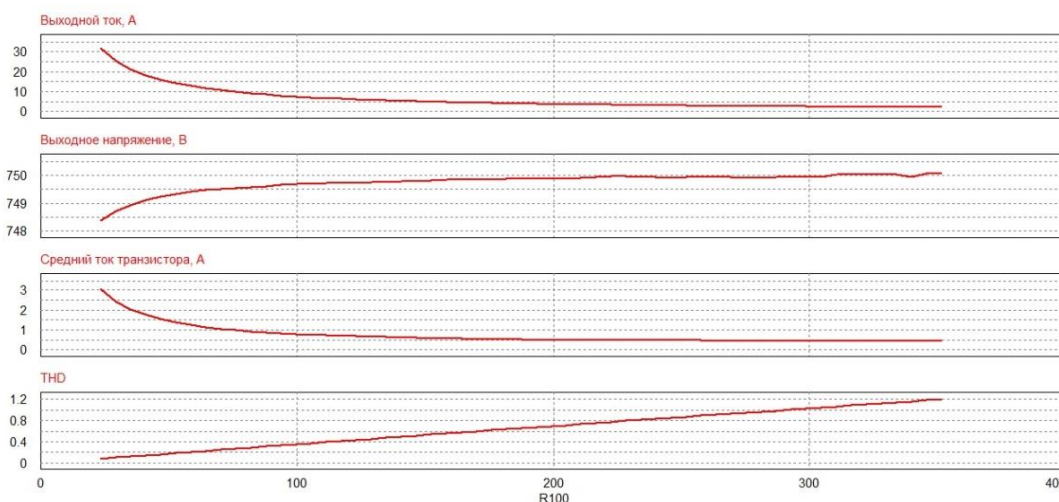


Рис. 4 – Диаграммы токов и напряжений выпрямителя при изменении выходной нагрузки

Моделирование показывает, что при изменении нагрузки от $0,1 R_{ном}$ до $1,5 R_{ном}$ выходное напряжение изменяется не более 1 В – это свидетельствует о том, что активный выпрямитель стабилизирует напряжение в режиме холостого хода и изменяющейся нагрузки.

В заключении можно сделать следующие выводы. Предложенная схема трехуровневого трехфазного инвертора обладает достаточной робастной устойчивостью и ее можно использовать для управления асинхронным двигателем мощностью 15 кВт. Использование алгоритмов оценки угловой скорости вращения электродвигателя [5] позволит разработать робастную бездатчиковую систему управления электроприводом.

Статья подготовлена как часть прикладных исследований в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии №14.574.21.0135 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных исследований является

RFMEFI57417X0135.

Список литературы

1. Сидоренко В.Н. Системно-динамическое моделирование в среде POWERSIM: Справочник по интерфейсу и функциям. – М.: МАКС-ПРЕСС, 2001. – 159 с.
2. Баховцев И.А. Построение трехфазного трехуровневого инвертора напряжения на базе квази-импедансного преобразователя. Научный вестник НГТУ. – №4(53). – 2013. – С.144–149.
3. ГОСТ 19523-81. Машины электрические вращающиеся от 50 до 355 габарита. Термины и определения // Электронный фонд правовой и нормативно-технической литературы. URL: <http://docs.cntd.ru/document/822918493> (дата обращения 02.01.2018)
4. Тверд М., Зеленский И., Копчак Л.С., Копчак Б.Л. Универсальный преобразователь частоты для электро-приводов переменного тока. Техническая электродинамика. Тематический выпуск. «Силовая электроника и ее энергоэффективность». Часть 1. 2004. С.19-20.
5. Таланов М.В., Карасев А.В., Таланов В.М. Бездатчиковая цифровая система управления асинхронным электроприводом с улучшенной оценкой угловой скорости / Таланов М.В., Карасев А.В., Таланов В.М. // ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ сборник трудов IV Международной научной конференции: в 2 томах. – 2015. – С. 61-68.

05.11.13

А.Г. Шляхова к.т.н., А.Т. Шляхов к.ф.-м.н.

Альметьевский государственный нефтяной институт, энергомеханический факультет,
кафедра нефтегазового оборудования и технологии машиностроения,
Альметьевск, 9274573382@mail.ru

ЭКСТРЕМУМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-42-45

Представлены результаты исследования электрофизических и люминесцентных свойств монокристаллов GaAs, легированных Te с концентрацией носителей заряда $n=10^{17}-7\cdot10^{18}\text{ см}^{-3}$. Получены немонотонные концентрационные зависимости степени компенсации, интенсивностей примесных и «краевой» полос рекомбинационного излучения, рассеяния свободных носителей заряда. Полученные данные интерпретируются как результат влияния легирующей примеси на перераспределение вакансий по подрешеткам кристалла, приводящее при $n\approx 2\cdot10^{18}\text{ см}^{-3}$ к смене ансамбля структурных примесных дефектов.

Ключевые слова: GaAs, Te, влияние легирования, концентрация, компенсация, подвижность, фотолюминесценция, температура, примесные комплексы, вакансии V_{Ga} и V_{As} , рассеяние, немонотонные зависимости.

1. Введение

Люминесцентные характеристики арсенида галлия определяются не только абсолютными значениями концентрации легирующей примеси, но и степенью ее компенсации. Поэтому изучение электрофизических свойств позволит установить роль собственных точечных структурных дефектов (СТСД) в механизме компенсации и её взаимосвязь с эффективностью люминесценции.

2. Методика эксперимента

Исследовались монокристаллы GaAs:Te, выращенные методом Чохральского из расплава стехиометрического состава, с концентрацией $n=1,7\cdot10^{17}-7\cdot10^{18}\text{ см}^{-3}$. Образцы вырезались из разных слитков, выращенных по единой технологии. На свежеполированную поверхность монокристаллов с помощью индия припаивались контактные медные проводники, соблюдая условие симметричности. Омичность контактов проверялись на приборе-испытателе р-п-переходов по обычной методике при температуре 77 К.

Исследования электропроводности, постоянной Холла, подвижности носителей заряда указанных образцов проводились в температурном интервале 77-400 К. Измерения эффекта Холла (R_H) и электропроводности (σ) осуществлялось методом Ван-дер-Пау [1] на образцах размерами 7×7 мм и толщиной $d = 150\div200$ мкм. Индукция магнитного поля в зазоре магнита измерялась с помощью прибора Ш1-8 и составила $B = 0,415$ Тл.

Исследования фотолюминесценции (ФЛ) проводились по стандартной методике. Для возбуждения использовался He-Ne- лазер с длиной волны 632,8 нм. Образец помещался в криостат и с помощью жидкого азота охлаждался до необходимой температуры. ФЛ излучение регистрировалось при помощи спектрофотометра СФ-26, с приемником ФЭУ-62, усилителем постоянного тока и самописцем.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Раздельное определение концентрации донорных и акцепторных центров (степени компенсации) проводили по диаграммам, построенным на основе формул Брукса-Херринга [2]. Для выполнения такого анализа были использованы результаты определения холловской концентрации носителей заряда (ХКНЗ) и подвижность при температуре 77 К.

На этом этапе исследования СТСД в монокристаллах GaAs: Te измеряли холловскую концентрацию носителей заряда (ХКНЗ) и их подвижность в температурном интервале 77 –

400 К. Пользуясь теоретическими зависимостями $\mu(n)$ по концентрации и соответствующей подвижности электронов при 77 К было найдено, что степень компенсации $K=N_A/N_D$ в этих кристаллах изменяется от 0,65 до 0,25 при увеличении уровня легирования (рис. 1).

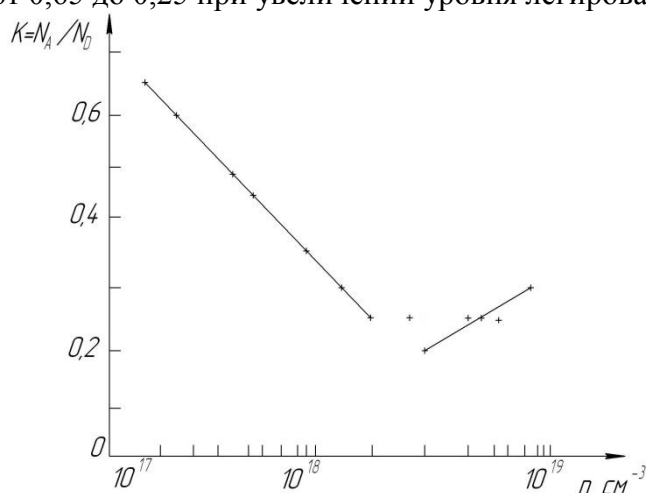


Рис.1. Зависимость коэффициента компенсации $K = N_A/N_D$ кристаллов GaAs: Te при 85 К от концентрации свободных носителей заряда.

В спектрах ФЛ образцов при 85 К с $n < 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ наблюдались полоса собственного излучения («краевая») с энергией максимума 1,51 эВ и широкая примесная полоса излучения с энергией 1,2 эВ (E_1). При концентрациях $n > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ наряду с резким возрастанием «краевой» полосы возникает новая примесная полоса с энергией 1,35 эВ (E_2).

Зависимость отношения интенсивностей акцепторных (E_1 и E_2) к донорной («краевой») линии фотолюминесценции при 85 К от концентрации свободных носителей заряда (рис.2) также характеризует степень компенсации материала. Имеется возможность сопоставить данные гальваномагнитных и фотолюминесцентных измерений изменения степени компенсации арсенида галлия от уровня легирования.

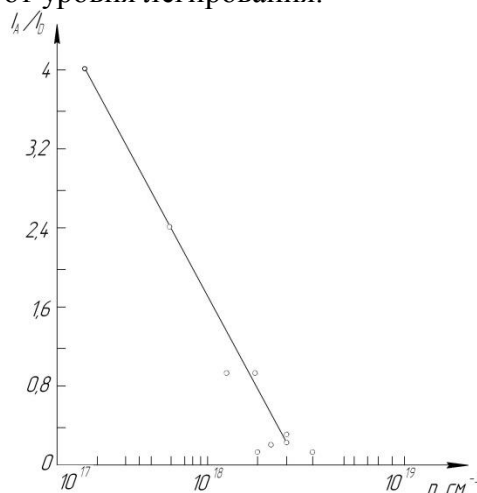


Рис.2. Зависимость отношения интенсивностей акцепторных (E_1 и E_2) к донорной («краевой») фотолюминесценции I_A/I_D кристаллов GaAs: Te при 85 К от концентрации свободных носителей заряда.

Действительно, рекомбинационные свойства GaAs: Te в диапазоне концентраций носителей 10^{17} - 10^{18} см^{-3} определяются наличием в кристалле вакансий галлия и комплексов с их участием $(V_{Ga} Te_{As})^{2-}$, ответственных за полосу E_1 (рис.3), при этом наблюдается сильная компенсация материала ($K = 0,6$). При $n \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ происходит смещение состава СТСД в сторону увеличения концентрации вакансий мышьяка, которые n^+ -GaAs, в силу своего донорного характера, полностью ассоциированы с атомами легирующей примеси, образуя новый акцепторный комплекс $(V_{Ga} Te_{As} V_{As})^-$, ответственный за полосу E_2 (рис.3). При этом увеличивается электрическая активность донорной примеси и степень компенсации имеет практически постоянное значение $K \approx 0,25$.

Физические характеристики кристаллов, имеющие особенности экстремального характера, могут быть объяснены существенным ослаблением роли СТСД, определяемым влиянием уровня легирования. Состав кристалла в экстремуме близок к «стехиометрическому».

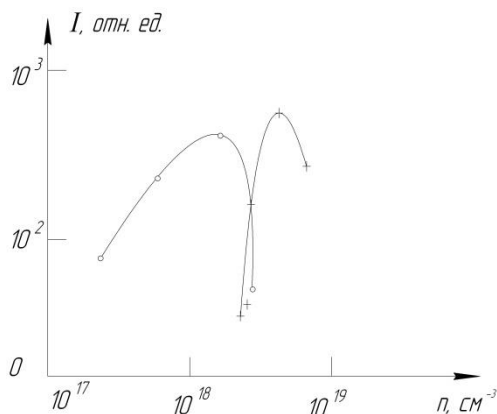


Рис.3. Изменение интенсивности в максимуме излучения примесных полос фотолюминесценции $E_1 \approx 1,2$ эВ (°) и $E_2 \approx 1,35$ эВ (+) кристаллов GaAs: Te при $T=85$ К от концентрации электронов.

В исследованном диапазоне температур для любых концентраций не наблюдалось зависимости концентрации электронов от T , что означает полную ионизацию мелких доноров, т.е. выполнение равенства $n=N_D-N_A$. На рис.4 представлены типичные температурные зависимости холловской подвижности μ_n монокристаллов арсенида галлия с умеренным уровнем легирования ($n=10^{17} \div 10^{18}$ см $^{-3}$, кривые 1 и 2) на которых видны два различных участка её поведения. При температурах ниже 200 К подвижность увеличивается с ростом T . Затем μ_n достигает максимума при $150 \div 200$ К, величина и положение которого зависит от концентрации электронов (n): с ростом n максимум уменьшается по величине и для $n \geq 2 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ вообще не наблюдается (рис.4 кривые 3 и 4). При высоких температурах ($T > 300$ К) для любого уровня легирования подвижность уменьшается по закону $\mu_n \sim T^{-(0,4 \div 0,5)}$.

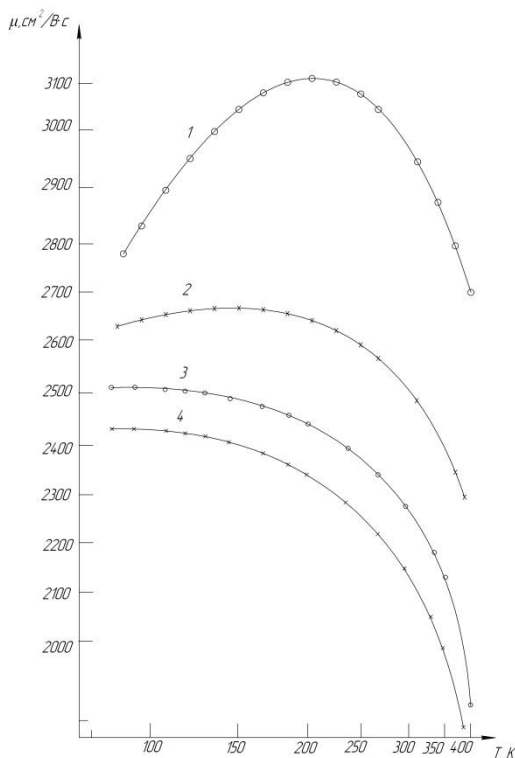


Рис.4. Температурная зависимость холловской подвижности в арсениде галлия с различным уровнем легирования: 1– $5,2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, 2– $1,5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, 3– $3 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, 4– $3,8 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$.

Для концентраций $n=10^{17}\div10^{18}\text{см}^{-3}$, из анализа температурных зависимостей подвижности электронов в области низких температур 77-200 К, следует о том, что основным механизмом рассеяния носителей заряда является рассеяние на двукратно ионизированных акцепторных центрах $(V_{\text{Ga}} \text{Te}_{\text{As}})^{2-}$ и на донорах $\text{Te}_{\text{As}}^{+}$. При концентрациях $n\geq 2\cdot 10^{18}\text{см}^{-3}$ преобладает рассеяние электронов на полярных и оптических фононах. Так как предполагается, что кулоновское взаимодействие между примесными дефектами $\text{Te}_{\text{As}}^{+}$ и $(V_{\text{Ga}} \text{Te}_{\text{As}} V_{\text{As}})^{-}$ приводит к эффектам спаривания и образованием крупномасштабных пар, которые ведут себя как дипольные рассеивающие центры с малой эффективностью рассеяния.

4. Заключение

Установлена взаимосвязь между электрической активностью СТСД в арсениде галлия n -типа и уровнем легирования. Легирование GaAs теллуром в диапазоне концентраций электронов $10^{17}\div10^{18}\text{см}^{-3}$ сопровождается генерацией вакансий галлия и примесных комплексов с их участием $(V_{\text{Ga}} \text{Te}_{\text{As}})^{2-}$, определяющих основной механизм рассеяния электронов, поэтому образцы имеют высокую степень компенсации $K\approx 0,6$.

При $n\approx 2\cdot 10^{18}\text{см}^{-3}$ происходит перестройка примесных полос люминесценции с максимумом энергии $\approx 1,2\text{эВ}$ (E_1) на полосу излучения $\approx 1,35\text{эВ}$ (E_2). Происходит смещение ансамбля СТСД в сторону увеличения концентрации вакансий мышьяка и примесных комплексов с их участием $(V_{\text{Ga}} \text{Te}_{\text{As}} V_{\text{As}})^{-}$, ответственных за полосу излучения $\approx 1,35\text{эВ}$. Наблюдается резкое возрастание интенсивности «краевой» полосы излучения, на порядок превышающей излучение примесных полос излучения, при этом степень компенсации имеет минимальное значение $K \approx 0,25$. Состав кристалла в экстремуме близок к «стехиометрическому».

Достигнутый уровень понимания влияния легирования на ансамбль СТСД в арсениде галлия позволяет решать практические задачи: например, авторам при выращивание более совершенных монокристаллов, и для контроля качества полупроводниковых материалов [3-5].

Список литературы

1. Кучис Е.В. Гальваноманнитные эффекты и методы их исследования. - М.: Радио и связь, 1990.-264 с.
2. W. Walukiewicz, L. Lagowski, L. Jastrzebski, M. Lichtensteiger and H.C. Gatos Electron mobility and free-carrier absorption in GaAs: Determination of the compensation ratio // J App. Phys 1979. v 50, №2, pp. 899-908.
3. Шляхова А.Г. Дифференциально-сканирующая калориметрия для контроля качества арсенида галлия. // Известия Вузов. Проблемы энергетики. 2006г., №11-12, с.104-107.
4. Патент № 2561335 (RU) Способ определения содержания металлических микровключений в полупроводниковых материалах // Шляхов А.Т., Шляхова А.Г. Приоритет: 24.03.14. Опубликовано: 27.08.15. Бюл.№24.
5. Шляхов А.Т., Шляхова А.Г. Термический анализ веществ: история разработок авторских изобретений // Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. - 2015. - т. XIV. – С.292-311.

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

05.13.00

В.Л. Акимов, А.С. Дюлина, М.В. Таланов

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Институт электроники и светотехники, кафедра электроники и электротехники,
Саранск, dyulina.anya@mail.ru, mvtal@mail.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ**DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-46-49**

В данной работе рассматривается система векторного управления электроприводом насосной установки. Исследуется работа предложенной системы управления в среде Matlab/Simulink.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, векторное управление, преобразователь частоты, крутящий момент, потокосцепление ротора.

В настоящее время для управления электромагнитным моментом асинхронного электродвигателя (АД) активно используются системы векторного управления, позволяющие регулировать скорость электродвигателя в широком диапазоне. В статье предлагается использовать систему косвенного векторного управления электроприводом насосной установки. В такой системе управления применяется только датчик скорости вращения ротора, что позволяет снизить затраты на разработку электропривода за счет исключения датчика магнитного потока ротора.

Упрощенная структура системы косвенного векторного управления АД с компенсацией скольжения представлена на рисунке 1.

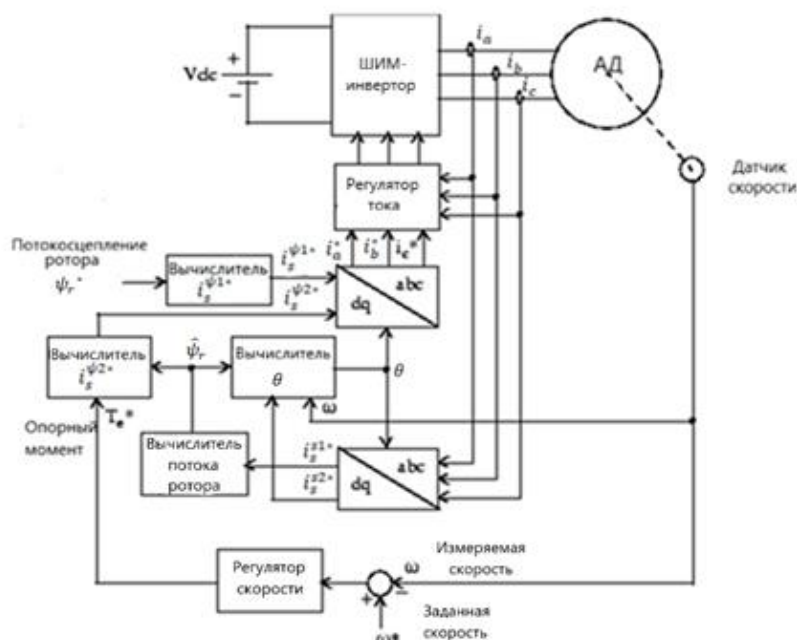


Рис. 1 – Упрощенная структура системы косвенного векторного управления АД с компенсацией скольжения

Векторное управление в асинхронном электроприводе осуществляется путем изменения величины и углового положения векторов переменных состояния асинхронного двигателя и частоты питающего напряжения [1 с. 217-218].

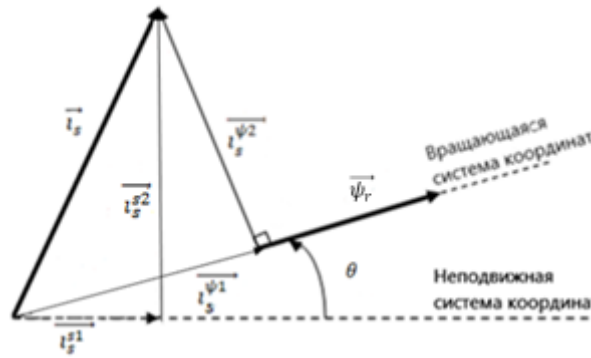


Рис. 2 – Векторная диаграмма

Рассмотрим векторную диаграмму на рисунке 2, отражающую зависимость векторов переменных состояния асинхронного двигателя. Вектор тока статора $\vec{i}_s$ представляет собой сумму двух векторов – $\vec{i}_s^1$ и $\vec{i}_s^2$, во вращающейся системе координат dq , ориентированной по вектору потокосцепления ротора $\vec{\psi}_r$.

В тоже самое время, в неподвижной системе координат, ориентированной по статору, вектор тока статора $\vec{i}_s$ является суммой двух векторов – $\vec{i}_s^{s1}$ и $\vec{i}_s^{s2}$. В системах векторного управления для взаимно однозначного разложения вектора тока статора в различных системах координат необходимо обеспечить, чтобы система координат dq вращалась со скоростью вращения вектора потокосцепления ротора.

Далее, рассмотрим зависимость электромагнитного момента и потокосцепления ротора асинхронного электродвигателя от компонентов вектора тока статора $\vec{i}_s$, во вращающейся системе координат dq .

На рисунке 1, ПИ-регулятор скорости по заданной скорости ω^* и измеренной скорости ω формирует новое значение электромагнитного момента T_e^* .

Координата вектора тока $\vec{i}_s$ по оси q вычисляется по величине электромагнитного момента T_e^* :

$$i_s^{\psi 2*} = \frac{2}{3} \frac{L_r}{P L_m} \frac{T_e^*}{\hat{\psi}_r}, \quad (1)$$

где $\hat{\psi}_r$ – это оценка потокосцепления ротора. Оценку $\hat{\psi}_r$ можно рассчитать по уравнению:

$$\hat{\psi}_r = \frac{L_m i_s^{s1*}}{1 + \tau_r s} \quad (2)$$

где $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ – постоянная времени ротора, L_r – индуктивность ротора, R_r – сопротивление ротора, s – оператор дифференцирования.

Координата вектора тока $\vec{i}_s$ по оси d рассчитывается на основе заданного потока ротора ψ_r^* :

$$i_s^{\psi 1*} = \frac{\psi_r^*}{L_m} \quad (3)$$

Положение потока ротора θ рассчитывается по уравнению:

$$\theta = \int (\omega_{sl} + \omega) dt. \quad (4)$$

Частота скольжения ω_{sl} , рассчитывается по измеренному току статора i_s^{s2*} :

$$\omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{\hat{\psi}_r L_r} i_s^{s2*}. \quad (5)$$

Опорные токи статора $i_s^{\psi 1*}$ и $i_s^{\psi 2*}$ преобразуются в трехфазные токи i_a^* , i_b^* , i_c^* с помощью преобразования Парка, по которым формируются управляющие сигналы для инвертора с помощью векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

На рисунке 3, представлена модель системы косвенного векторного управления АД в среде Matlab/Simulink.

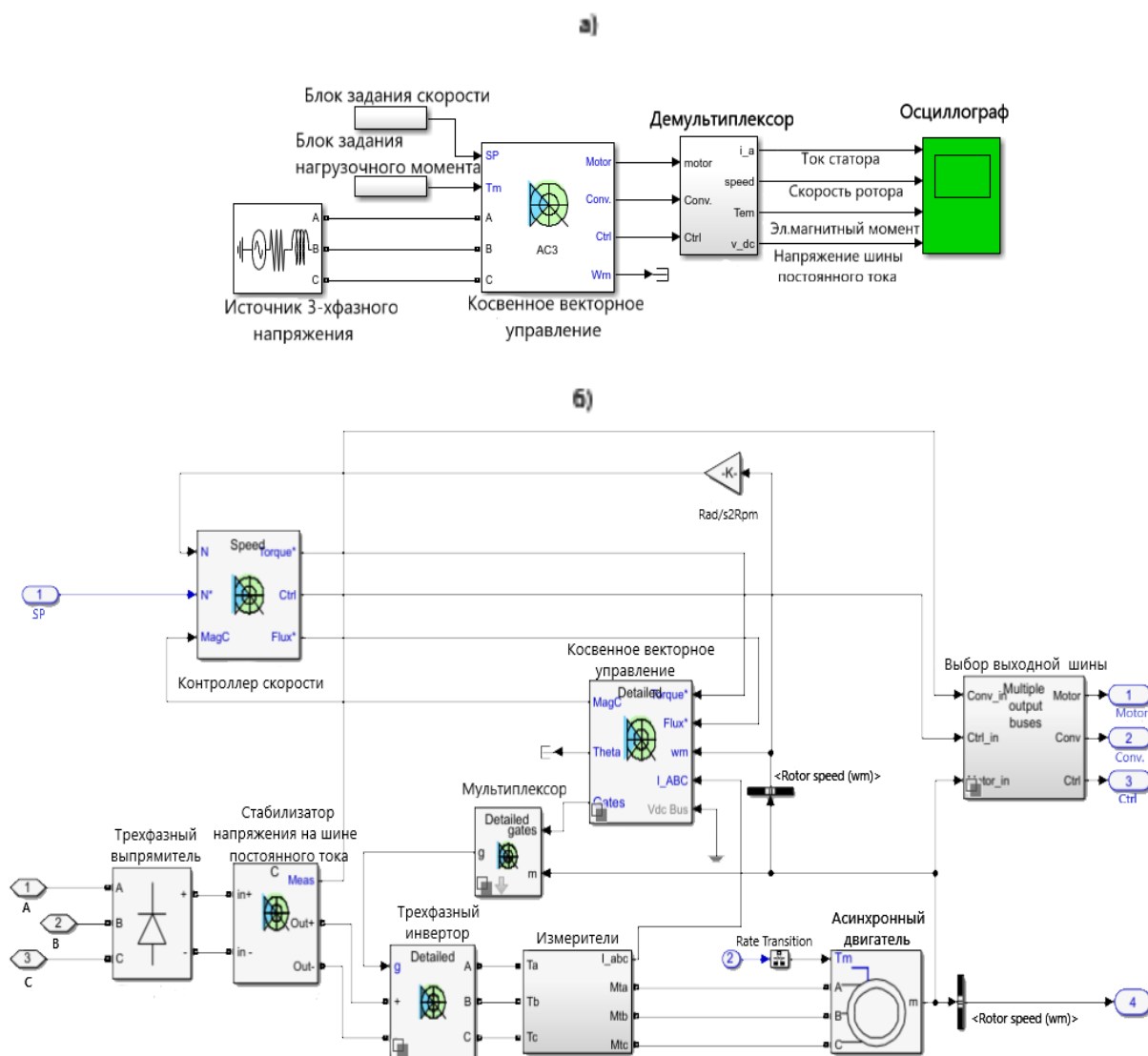


Рис. 3 – а) Укрупненная модель системы косвенного векторного управления АД с компенсацией скольжения; б) Структурная схема системы косвенного векторного управления

На рисунке 3а, представлена укрупненная модель системы косвенного векторного управления АД с компенсацией скольжения. Параметры модели: блок задатчика скорости – 1500 об/мин; блок задатчика нагрузочного момента – 145 Нм; источник 3-х фазного напряжения – 380 В; частота питающего напряжения – 50 Гц.

На рисунке 3б, представлена структурная схема модели системы косвенного векторного управления, выполненной по уравнениям (1)-(5).

Параметры модели двигателя соответствуют параметрам двигателей типа 4A200M6Y3: мощность – 22 кВт; напряжение сети – 380 В; частота сети – 50 Гц; номинальная скорость вращения двигателя – 1500 об/мин, индуктивность обмоток статора – 1,136 Ом; индуктивность обмоток ротора – 0,75 Ом; сопротивление обмоток статора – 0,0027 Гн; сопротивление обмоток ротора – 0,067 Гн.

В результате моделирования предложенной системы управления при имитации характерной нагрузки для насосов, были получены временные диаграммы, представленные на рисунке 4. Скорость ротора достигает заданного значения – 1500 об/мин – в момент $t=1.6$ с после начала моделирования. При этом момент нагрузки составлял 145 Нм. Устойчивость работы системы управления была проверена путем многократного наброса и сброса нагрузки на валу АД.

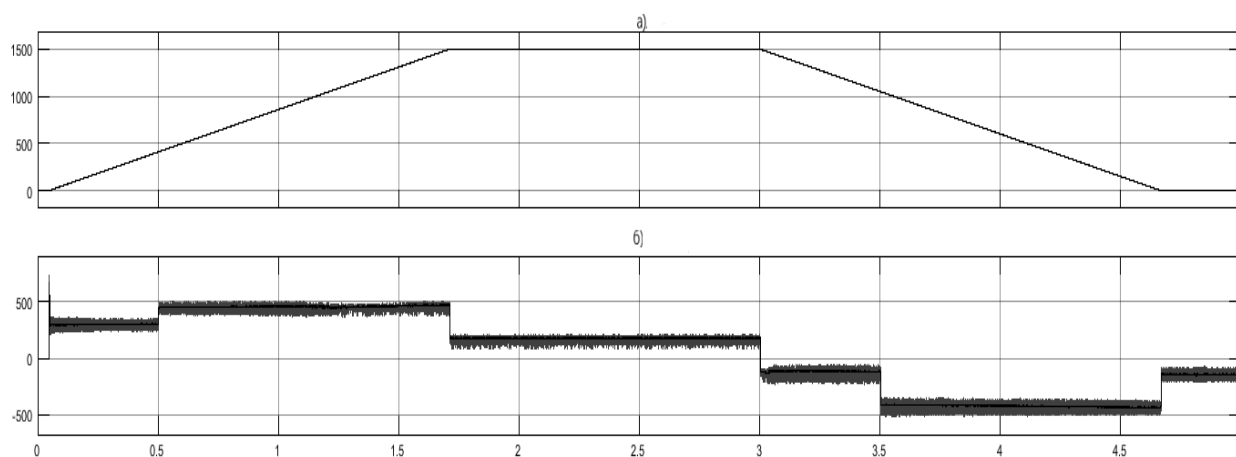


Рис. 4 – а) Скорость вращения ротора; б) Момент нагрузки на валу АД

Представленные в статье результаты моделирования в среде Matlab/Simulink подтверждают возможность использования такой системы управления для насосной установки и построения на ее основе цифровой системы управления на базе современных микропроцессоров [2].

Статья подготовлена как часть прикладных исследований в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии №14.574.21.0135 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных исследований является RFMEFI57417X0135.

Список литературы

1. *Виноградов А.Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». А.Б. Виноградов – Иваново, 2008. – 298 с.
2. *Таланов М.В.* Реализация расширенного фильтра Калмана на микроконтроллере TMS320F28335 для определения угловой скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя / Таланов М.В. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 2. С. 212-217.

05.13.18

И.А. Акимов д.т.н., В.А. Урбан к.т.н.

Оренбургский государственный аграрный университет,
Институт управления рисками и комплексной безопасности,
кафедра техносферной и информационной безопасности,
Оренбург, akimov_ia@mail.ru, urban.vladimir@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ ТЕПЛООБМЕНА НА ПЕРВОМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-50-53

В работе рассматривается теплообмен в производстве многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации в автоклавах. Такие изделия широко используются в авиационной промышленности и космической технике.

Ключевые слова: теплообмен, полимеризация, многослойные конструкции, сферическая форма, этапы производства, авиационная и космическая техника.

Аналитическая теория теплообмена является научной основой при изучении тепловых процессов, протекающих в современных теплотехнических установках. Знание механизмов переноса тепла позволяет находить наиболее оптимальные условия проведения тепловых процессов, создать материалы с заданными физическими свойствами, осуществлять контроль за технологическими процессами производства, а также решать многие другие технические задачи.

Задачи теплопереноса для многослойных конструкций относятся к задачам с граничными условиями четвертого рода. В связи с развитием высокотемпературной теплофизики они приобретают первостепенное значение при проведении тепловых и прочностных расчетов конструкций авиационной и космической техники, расчетов многослойных композиционных материалов, широко применяемых во многих отраслях промышленности. Следует отметить, что для получения многослойных материалов с заданными свойствами наилучшим образом подходят аналитические решения, т.к. они в явном виде содержат основные физические свойства среды.

В данной работе рассматривается первый этап производства многослойных конструкций сферической формы в автоклавах. На первом этапе производства многослойных конструкций методом полимеризации протекает невязаносвязанный теплообмен. Поэтому отдельно рассматриваются теплообмен и отдельно массообмен, хотя они решаются по одной и той же схеме.

Как известно, математическая модель теплообмена в многослойных конструкциях сферической формы описываются дифференциальными уравнениями в частных производных параболического типа и имеют вид (центральная симметрия).

$$\frac{dU_i(r_i, \tau)}{d\tau} = a_i^2 \left(\frac{d^2 U_i(r_i, \tau)}{dr_i^2} + \frac{2}{r_i} \frac{dU_i(r_i, \tau)}{dr_i} \right) + \frac{q_i}{c_i \rho_i}; \quad (1)$$

$$i=1, 2, 3, \dots, N, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad \tau > 0$$

$$\text{с НУ:} \quad U_i(r_i, 0) = f_i(r_i); \quad (2)$$

$$\text{и ГУ:} \quad \lambda_1 \frac{dU_i(R_0, \tau)}{dr_i} - \alpha_1 [U_1(R_0, r) - U_{c1}] = 0 \quad (3)$$

$$\lambda_N \frac{dU_N(R_N, \tau)}{dr_N} + \alpha_N [U_N(R_N, r) - U_{cN}] = 0 \quad (4)$$

и с условиями сопряжения

$$U_j(r_j, \tau) = U_{j+1}(r_j, \tau); \quad \lambda_1 \frac{dU_j(R_j, \tau)}{dr_j} = \lambda_{j+1} \frac{dU_{j+1}(R_j, \tau)}{dr_{j+1}} \quad j=1,2,3,\dots,N-1 \quad (5)$$

где U -температура, a_i^2 -температуропроводность слоя; r_i - текущий радиус слоев, q_i -мощность источника; C_i -удельная теплоемкость слоя; ρ_i -плотность материала слоя; N -количество слоев; R_i -радиусы слоев; α_i -коэффициент теплового взаимодействия поверхностного слоя со средой; λ_i -коэффициент теплопроводности слоев; R_0 -радиус поверхности внутреннего слоя; R_N -радиус поверхности внешнего слоя; U_i -температура внутренней поверхности изделия; U_N -температура внешней поверхности изделия; U_{c1} -температура вне внутреннего слоя; U_{cN} -температура вне внешнего слоя изделия.

Для решения задач теплопроводности в многослойных телах с неоднородными граничными условиями предпочтительнее решение искать в виде алгебраической суммы решений стационарной задачи теплопроводности с неоднородными граничными условиями и нестационарной задачи теплопроводности с однородными граничными условиями, т.к. непосредственное решение исходной задачи приводит к медленно сходящимся рядам, что удлиняют расчеты [1]

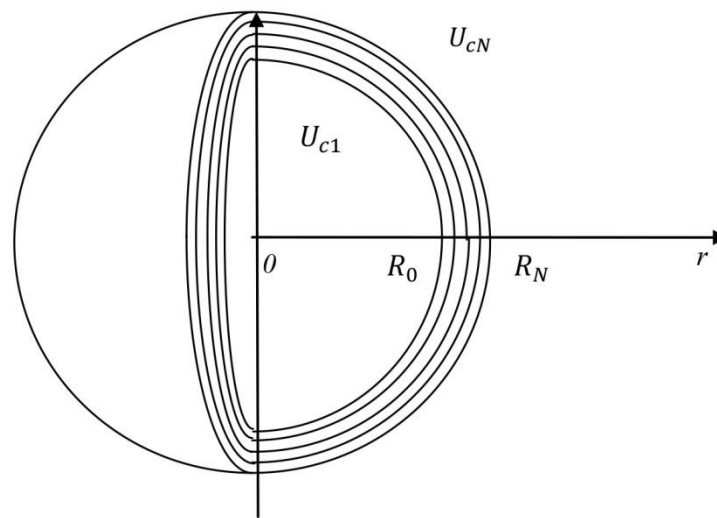


Рис.1 N- слойный шар

Решение задачи (1)-(5) ищем в виде

$$U_i(r_i, \tau) = S_i(r_i) + P_i(r_i, \tau), \quad i = 1,2,\dots,N \quad (6)$$

где $S_i(r_i)$ - решение стационарной задачи с неоднородными граничными условиями

$$\frac{d^2 S_i(r_i)}{dr_i^2} + \frac{2}{r_i^2} \frac{dS_i(r_i)}{dr_i} = 0 \quad i = 1,2,\dots,N, R_{i-1} \leq r \leq R_i \quad (7)$$

$$\lambda_1 \frac{dS_i(R_0)}{dr_i} - \alpha_1 [S_1(R_0) - U_{c1}] = 0 \quad (8)$$

$$\lambda_N \frac{dS_N(R_N)}{dr_N} - \alpha_N [S_N(R_N) - U_{cN}] = 0 \quad (9)$$

$$S_j(R_j) = S_{j+1}(R_j); \quad \lambda_j \frac{dS_j(R_j)}{dr_j} = \lambda_{j+1} \frac{dS_{j+1}(R_j)}{dr_{j+1}} \quad (10)$$

$j=1,2,\dots,N-1$ -границы сопряжения.

Решение стационарной задачи (7)-(10) имеет вид: [2]

$$S_i(r_i) = A_i + \frac{B_i}{r_i} \quad (11)$$

$$\text{где } B_1 = \frac{U_{cN} - U_{c1}}{\frac{\lambda_1}{R_N} \left(\frac{1}{\lambda_N} - \frac{1}{R_N \alpha_N} \right) - \frac{\lambda_1}{R_0} \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{R_0 \alpha_1} \right) + \sum_{k=1}^{N-1} \frac{\lambda_1}{R_k} \left(\frac{1}{\lambda_k} - \frac{1}{\lambda_{k+1}} \right)} \quad (12)$$

$$A_{1=U_{c1} - \frac{B_1}{R_0} \left(\frac{\lambda_1}{\alpha_1} + 1 \right)} \quad (13)$$

$$B_{j+1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_{j+1}} B_1, j=1,2,\dots,N-1 \quad (14)$$

$$A_{j+1} = A_j + \frac{B_j}{R_j} \left(1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_{j+1}} \right) \quad (15)$$

$P_i(r_i, \tau)$ -является решением нестационарной задачи с однородными граничными условиями:

$$\frac{dP_i(r_i, \tau)}{d\tau} = a_i^2 \left(\frac{d^2 P_i(r_i, \tau)}{dr_i^2} + \frac{2}{r_i} \frac{dP_i(r_i, \tau)}{dr_i} \right) + \frac{q_i}{C_i \rho_i}; \quad (16)$$

$$i=1, 2, 3, \dots, N, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad \tau > 0$$

$$P_i(r_i, 0) = f_i(r_i) - S_i(r_i); \quad (17)$$

$$\lambda_1 \frac{dP_i(R_0, \tau)}{dr_i} - \alpha_1 P_1(R_0, r) = 0 \quad (18)$$

$$\lambda_N \frac{dP_N(R_N, \tau)}{dr_N} + \alpha_N P_N(R_N, r) = 0 \quad (19)$$

$$P_j(R_j, \tau) = P_{j+1}(R_j, \tau); \lambda_j \frac{dP_j(R_j, \tau)}{dr_j} = \lambda_{j+1} \frac{dP_{j+1}(R_j, \tau)}{dr_{j+1}} \quad (20)$$

$j=1, 2, \dots, N-1$ -границы сопряжения.

Решение задачи (16)-(20) получено методом конечных интегральных преобразований [3]

$$\bar{P} = (\mu_n, \tau) = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \int_{R_{m-1}}^{R_m} \rho(r_m) W_m(r_m, \lambda) \cdot R_m(r_m, \tau) dr_m \quad (21)$$

где $\rho(r_m) = r_m^2$ - весовая функция, являющаяся решением уравнения

$$\frac{d\rho(r)}{dr} - 2 \frac{\rho(r)}{r} = 0 \quad (22)$$

Обратный переход осуществляется по формуле

$$P_m(r_m, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{P}(\mu_n, \tau) \cdot W_m(r_m, \mu_n)}{Q_n}, \quad (23)$$

$$\text{где } Q_n = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m^2 \cdot W_m^2(r_m, \mu_n) dr_m, \quad (24)$$

а ядро интегрального преобразования $W_m(r_m, \mu)$ является решением вспомогательной задачи (здесь μ -параметр):

$$\frac{d^2 W_m(r_m, \mu)}{dr_m^2} + \frac{2}{r_m} \frac{dW_m(r_m, \mu)}{dr_m} + \frac{\mu^2}{a_m^2} W_m(r_m, \mu) = 0 \quad (25)$$

$$m=1, 2, 3, \dots, N, \quad R_{m-1} \leq r_m \leq R_m;$$

$$\lambda_1 \frac{dW_1(R_0, \mu)}{dr_1} - \alpha_1 W_1(R_0, \mu) = 0 \quad (26)$$

$$\lambda_N \frac{dW_N(R_N, \mu)}{dr_N} + \alpha_N W_N(R_N, \mu) = 0 \quad (27)$$

$$W_j(R_j, \mu) = W_{j+1}(R_j, \mu); \lambda_j \frac{dW_j(R_j, \mu)}{dr_j} = \lambda_{j+1} \frac{dW_{j+1}(R_j, \mu)}{dr_{j+1}}, \quad (28)$$

$j=1, 2, \dots, N-1$

Решение вспомогательной задачи (25) имеет вид

$$W_m(r_m, \mu_n) = \frac{C_{m,n}}{r_m} \sin\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right) \quad (29)$$

И подставляя ее в граничные условия (26)-(28), находим числа $C_{m,n}$, $\varphi_{m,n}$, μ_n , причем C_m принимается равными 1:

$$\varphi_{1,n} = -\frac{\mu_n R_0}{a_1} + \arctg \left[\frac{\lambda_1 R_0 \mu_n}{a_1 (\alpha_1 R_0 + \lambda_1)} \right]; \quad (30)$$

$$\varphi_{m+1,n} = -\frac{\mu_n R_m}{a_{m+1}} + \arctg \left[\frac{a_{m+1}}{\lambda_{m+1} \mu_n} \left(\frac{\lambda_{m+1} - \lambda_m}{R_m} + \frac{\mu_n \cdot \lambda_m}{a_m} \cdot \tg \left(\frac{\mu_n}{a_m} R_m + \varphi_{m,n} \right) \right) \right] \quad (31)$$

$m=1, 2, \dots, N-1$

$$C_{m+1,n} = C_{m,n} \frac{\sin\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right)}{\sin\left(\frac{\mu_n}{a_{m+1}} R_m + \varphi_{m+1,n}\right)}; \quad (32)$$

μ_n -n-ый положительный корень уравнения

$$\frac{\mu_n}{a_n} \cos\left(\frac{\mu_n R_N}{a_n} + \varphi_N\right) + \left(\frac{\alpha_N}{\lambda_N} - \frac{1}{R_N}\right) \sin\left(\frac{\mu_n R_N}{a_n} + \varphi_N\right) = 0 \quad (33)$$

Тогда

$$Q_n = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m^2 \cdot W_m^2(r_m, \mu_n) dr_m = 0,5 \cdot \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot C_{m,n}^2 \cdot \left\{ R_m - R_{m-1} - \frac{a_m}{2\mu_n} \left[\sin\left(2\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right)\right) - \sin\left(2\left(\frac{\mu_n R_{m-1}}{a_m} + \varphi_{m,n}\right)\right) \right] \right\} \quad (34)$$

Применяя преобразование (21) к задаче (16)-(20), переходим к изображениям:

$$\frac{d\bar{P}_m(\mu_n, \tau)}{d\tau} + \mu_n^2 \cdot \bar{P}(\mu_n, \tau) = F_n \quad (35)$$

$$\bar{P} = (\mu_n, 0) = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot \int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m^2 \cdot [f_m(r_m) - S_m(r_m)] \cdot W_m(r_m, \mu_n) dr_m \quad (36)$$

где F_n - изображение функции распределительного источника

$$F_n = \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot \frac{1}{c_m \rho_m} \int_{R_{m-1}}^{R_m} \rho(r_m) \cdot W_m(r_m, \mu_n) g_m dr_m \quad (37)$$

Решением задачи (35)-(36) являются функции

$$\bar{P} = (\mu_n, \tau) = \left[\bar{P}(\mu_n, 0) - \frac{F_n}{\mu_n^2} \right] \cdot e^{\mu_n^2 \cdot \tau} + \frac{F_n}{\mu_n^2} \quad (38)$$

Окончательно, решение исходной задачи (1)-(5) имеет вид:

$$U_i(r_i, \tau) = A_i + \frac{B_i}{r_i} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_{in} \sin\left(\frac{\mu_n r_i}{a_i} + \varphi_{i,n}\right) \cdot e^{\mu_n^2 \cdot \tau} \cdot \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} C_{m,n}}{0,5 \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} C_{m,n}^2} \cdot \frac{\int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m \left[f_m(r_m) - A_m - \frac{B_m}{r_m} \right] \sin\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right) dr_m}{\left\{ R_m - \frac{a_m}{\mu_n} \left[\sin\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right) \cos\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right) - \sin(\varphi_{m,n}) \cos(\varphi_{m,n}) \right] \right\}} \quad (39)$$

Список литературы

1. Туголуков Е.Н. Решение задач теплопроводности методом конечных интегральных преобразований. Тамбов. Издательство ГТУ, 2005г, - 174с.
2. Акимов И.А. Исследование и разработка математической цели на первом этапе производства некоторых типов композиционных материалов в установках Шольца / И.А.Акимов, А.И. Акимов, Е.О. Каракулина/ Научно-технический вестник Поволжья 2016г, - 54с.
3. Фазлутдинова Т.Е., Куракина В.Н. Концентрация напряжений в слоистой среде// Научно-технический вестник поволжья, Казань. – 2013, - №6 с.466-468

05.13.00

В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.В. Таланов

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Институт электроники и светотехники, кафедра электроники и электротехники,
Саранск, chembarova1@mail.ru, dubuch1995@mail.ru, mvtal@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ И С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИ ОДНОГО ЦИКЛА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-54-56

Выполнены расчеты и анализ кривых входных токов корректоров коэффициента мощности с разными топологиями. Проведен спектральный анализ тока, потребляемого из сети.

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, спектр потребляемого тока, преобразователь частоты, управление внутри одного цикла, система автоматического управления.

В настоящее время возрастают требования к качеству потребляемой электроэнергии. Принимаются различные стандарты и ограничения, призванные улучшить форму входного тока и ограничить его гармоники, которые пагубно влияют на питающую сеть и на приборы, подключенных к ней.

Использование корректоров коэффициента мощности (ККМ) позволяет снизить или подавить гармоники потребляемого тока, что приводит к улучшению качества сети и к снижению потерь на фильтрующих элементах.

В статье представлены результаты сравнительного анализа динамики ККМ с различными типами систем автоматического управления (САУ), обеспечивающих необходимые энергетические показатели системы, а также работу преобразователя в динамическом режиме. Приведены сравнения двух систем управления – на базе умножителя с пропорциональными регуляторами (П-регуляторами) в контурах регулирования и однофазного ККМ с системой управления ОСС – One Cycle Control (управление внутри одного цикла).

В статье проведены исследования силовых частей систем регулирования ККМ, представлен анализ энергетических показателей.

Были проведены энергетические характеристики однофазного ККМ с САУ на базе умножителя с П-регуляторами в контурах регулирования.

Исследования моделей ККМ (рисунок 1) выполнены при параметрах силовой цепи с использованием стандартных методик [1]. Моделирование преобразователя мощностью 1 кВт проводилось в системе моделирования OrCAD при следующих параметрах: $U_C = 220$ В – входное напряжение; $U_{ВЫХ} = 400$ В – запрашиваемое выходное напряжение; $f_K = 40$ кГц – частота включений ключа; $L_1 = 2,4$ мГн – индуктивный фильтр; $C_1 = 1000$ мкФ – емкостной фильтр; $R_1 = 1$ Ом – суммарные потери в элементах; $R_H = 160$ Ом – сопротивление нагрузки.

Так же, в системе управления задаются следующие параметры: 0,01 – делитель выходного напряжения; $U_3 = 4$ В – напряжение задания; 1 – коэффициент обратной связи (ОС) тока дросселя; 0,0032 – делитель входного выпрямленного напряжения; $K_p U = 20$ – коэффициент усиления регулятора напряжения; $K_p I = 10$ – коэффициент усиления регулятора тока; $U_{оп} = 10$ В – амплитудное значение генератора развертывающих напряжений [2].

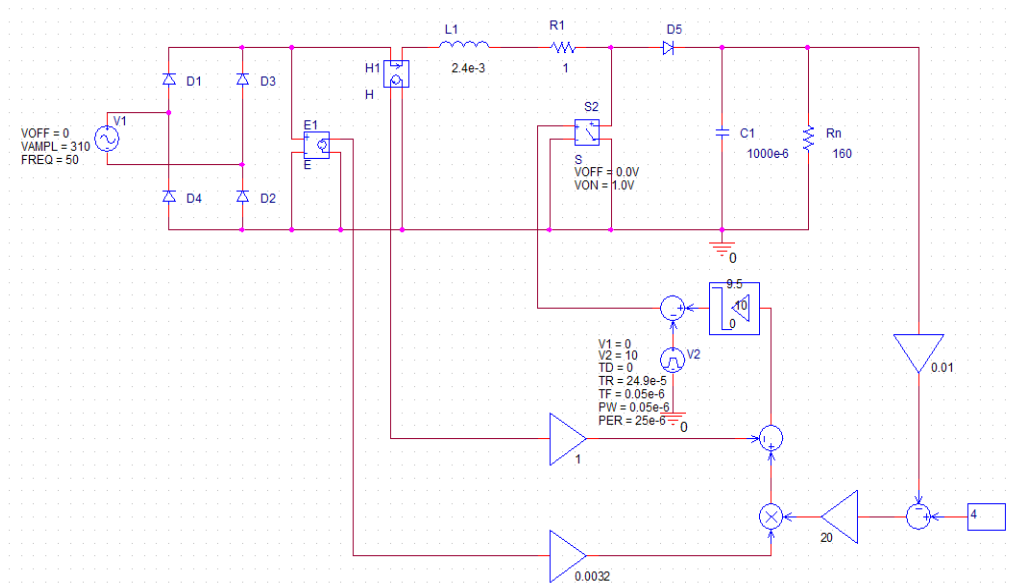


Рис. 1 – Модель ККМ на базе умножителя с П-регуляторами

При анализе временных диаграмм, полученных в результате работы преобразователя, было замечено, что выходное напряжение и выходной ток уже в четвертом полупериоде достигают установившегося значения.

В начальный момент времени, из-за разряженной емкости при запуске ККМ возникает бросок тока, достигающий 102 А. Подобных бросков тока нужно избегать в реальных условиях работы преобразователя, так как это может привести к необратимым последствиям. Во избежание подобной ситуации следует использовать схемы плавного пуска.

Выполнив спектральный анализ потребляемого тока, были получены не только основные гармоники на частоте 50 Гц, но и высшие гармоники, доходящие до частоты коммутации силового ключа и выше.

Энергетические показатели схемы: $KI = 0,99$; $\cos\varphi = 0,9994$; $K\Gamma = 0,1411$; $KM = 0,9894$. Необходимо отметить, что они не являются оптимальными, так как коэффициент гармоник тока выше 14%. Для определения экстремальных энергетических показателей целесообразно использовать параметрический анализ.

Далее определим энергетические характеристики однофазного ККМ с системой управления на базе OCC [3, 4].

В системе управления (рисунок 3) заданы следующие параметры: $T = 25$ мкс – постоянная времени интегрирования; $K_p I = 1$ – коэффициент усиления регулятора тока дросселя.

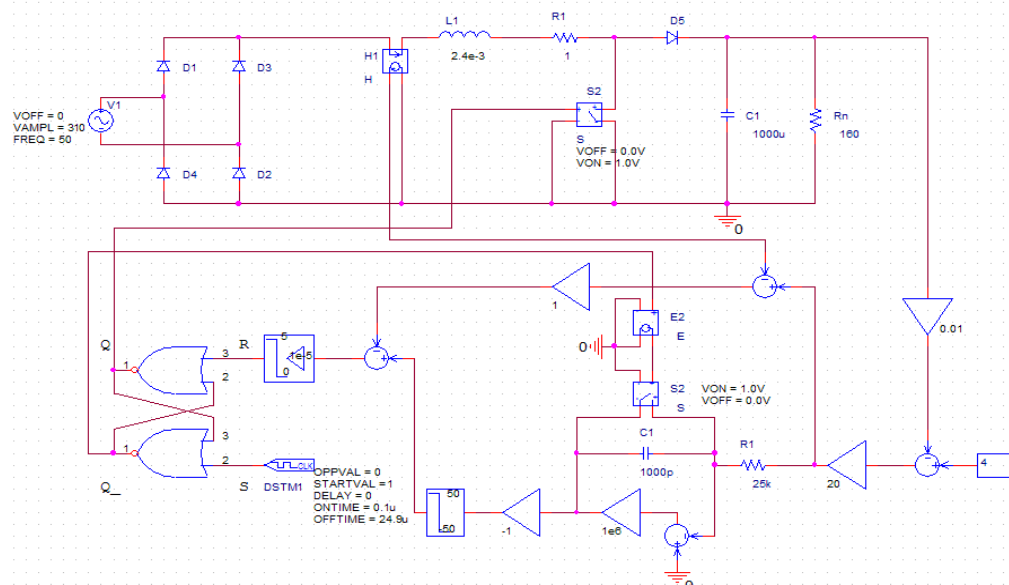


Рис. 2 – Модель ККМ на базе САУ с OCC

При анализе мгновенного тока дросселя и потребляемого тока (рисунок 3), выявлено, что преобразователь на основе ОСС работает в режиме непрерывного тока дросселя, что не было достигнуто при работе преобразователя с умножителем.

Непрерывный ток дросселя можно наблюдать при переходе тока из положительного значения в отрицательное. Следует отметить, что имеется искажение синусоидальности потребляемого тока в начальный период времени.

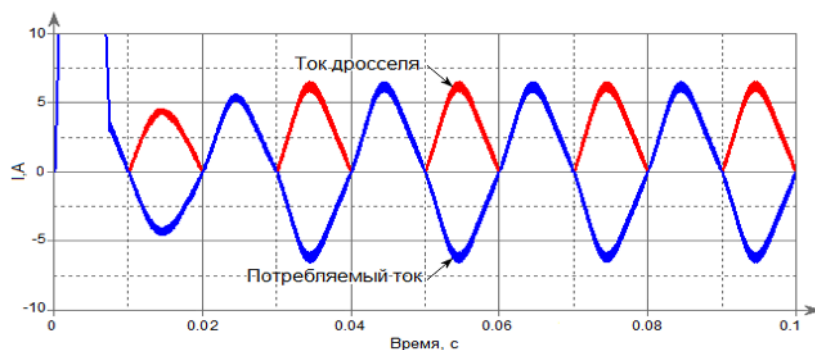


Рис. 3 – Мгновенные значения тока дросселя и потребляемого тока

Энергетические показатели схемы: $KI = 0,9968$; $\cos\varphi = 0,9997$; $KГ = 0,0802$; $KМ = 0,9965$. По этим значениям, видно, что показатели системы с преобразователем, с использованием технологии ОСС лучше, так как имеет малое число гармонических составляющих, что является плюсом подобной системы управления, третья гармоника уменьшилась приблизительно в два раза.

В заключении можно сделать следующие выводы. Использование преобразователя на основе ОСС является более предпочтительным по сравнению с преобразователем на основе умножителя. Более высокие энергетические показатели позволяют использовать данную систему управления с преобразователем частоты насосной установки. В совокупности с улучшенными алгоритмами оценки состояния электродвигателя [5] возможна разработка энергоэффективной робастной системы управления электроприводом насосной установки.

Статья подготовлена как часть прикладных исследований в соответствии с Соглашением о предоставлении субсидии №14.574.21.0135 при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных исследований является RFMEFI57417X0135.

Список литературы

1. Малаханов А.А. Математическое моделирование импульсно-модуляционных систем с коррекцией коэффициента мощности: дис. канд. техн. наук: 05.13.18 Брянск, 2007. С. 170-175.
2. Кастров М.Ю. Однофазные корректоры коэффициента мощности в системах вторичного электропитания / М. Ю. Кастров, А. А. Герасимов, Г. М. Малышков // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – №1. С 40-43.
3. Qiao, C. Improved Integration Control of Power Factor Correction / C. Qiao, K. Smedley // IEEE Industrial Electronics Conference (IECON). – 1999. – P. 513-519. С. 129-132.
4. Smith, M. PWM Controller with One-Cycle Response / M. Smith, K. Smedley // US Patent 6 084 450. С.98-101.
5. Таланов М.В., Карасев А.В., Таланов В.М. Способ уменьшения погрешности оценки угловой скорости вращения ротора асинхронного электродвигателя при использовании фильтра Калмана в цифровой системе управления / Таланов М.В., Карасев А.В., Таланов В.М. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 2. С. 183-185.

05.13.18

Е.И. Васильева, В.О. Каледин

Новокузнецкий институт (филиал) ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», факультет информационных технологий,
кафедра математики и математического моделирования,
г. Новокузнецк, lenavas2003@mail.ru, vkaled@mail.ru

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СКОРОСТЕЙ НА РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В КАВЕРНЕ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-57-59

Предложено решение задачи о течении жидкости в каверне. Расчёты выполнены для двумерной задачи. При численном моделировании была использована модель вязкой сплошной среды. В качестве метода решения задачи выбран метод конечных элементов. Результаты расчёта сопоставляются с известными данными.

Ключевые слова: вязкая сплошная среда, поля скоростей, коэффициент вязкости, метод конечный элементов, каверна.

Исследования установившихся течений жидкости в каналах приобретают большое значение для многих отраслей промышленности и науки. В связи с этим возникает необходимость математического моделирования стационарного и нестационарного движения вязкой сплошной среды.

Модельная среда, рассмотренная в публикациях [1, 2], при различных значениях коэффициентов – параметров реологического уравнения может описывать ламинарное течение различных физических сред.

Разработанный алгоритм для расчета поля скоростей был реализован в составе программного комплекса «Композит НК» [3].

Протестируем разработанную модель и методику на решении достаточно известной задачи о двумерном течении жидкости в каверне.

Рассматривается стационарное, ламинарное течение вязкой жидкости в прямоугольной области длиной L и глубиной H .

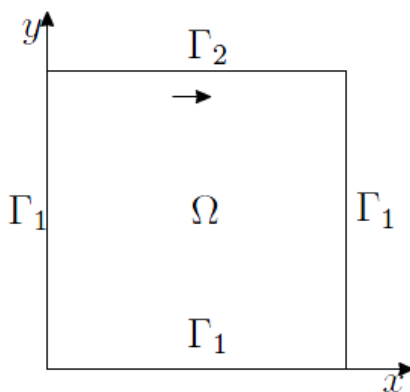


Рис. 1 – Течение в квадратной каверне: $v_x = v_y = 0$ на Γ_1 ; $v_x = 1, v_y = 0$ на Γ_2

Движение жидкости, заполняющей каверну, происходит за счёт сил вязкости. Действие массовых сил незначительное. Скорость потока на верхней границе равна $U=1$ м/с. На оставшихся границах поставим условие прилипания, т.е. скорость потока равна нулю на поверхности неподвижных стенок и совпадает со скоростью верхней стенки, когда частицы жидкости соприкасаются. Из условия прилипания также следует отсутствие скольжения жидкости по поверхности.

Физический процесс описывается с помощью уравнений:

$$\begin{cases} \left(\xi + \frac{1}{3} \mu \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^*}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right) + \rho b_x = \\ = \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right), \\ \left(\xi + \frac{1}{3} \mu \right) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \frac{\partial p^*}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + \rho b_y = \\ = \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right); \end{cases}$$

Граничные условия в соответствии с физической постановкой будут иметь вид:

$$x = 0 : v_y = 0; x = L : v_y = 0;$$

$$y = 0 : v_x = 0; y = H : v_x = 1.$$

Для построения конечно-элементной модели и задания исходных данных используется язык программирования «Ядро». Язык отличается наличием развитых средств генерирования и обработки числовых последовательностей, обладающих регулярностью, и этим удобен для построения генераторов регулярных сеток [4].

Исходная область была разбита на 1682 треугольника с линейной интерполяцией скоростей.

Для отображения расчётной области воспользовались программой «Anaglyph», которая предназначена для построения анаглифных изображений конечно-элементных моделей [5].

Расчёт течения в каверне был проведён в широком диапазоне значений коэффициента объёмной вязкости от 0,001 до 1, при этом сдвиговая вязкость, плотность и скорость крышки оставались постоянными. Расчёты проводились на равномерной декартовой сетке с детализацией 30x30 (рис. 2). Результаты численного расчёта при увеличении коэффициента объёмной вязкости представлены на следующем рисунке.

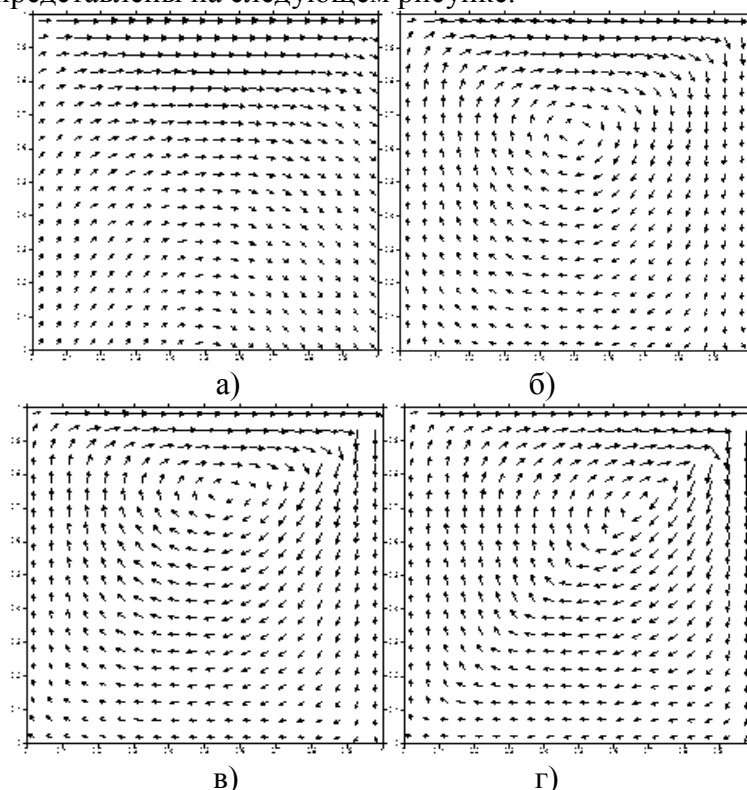


Рис. 2 – Направления скоростей потока при увеличении коэффициента объёмной вязкости: а) 0.001, б) 0.01, в) 0.1, г) 1.

Из рисунка видно, что течение имеет циркуляционный характер. С увеличением коэффициента объёмной вязкости центр вихря смещается по направлению движения, т.е. в сторону верхнего правого угла.

Сравним полученные результаты с результатами других авторов.

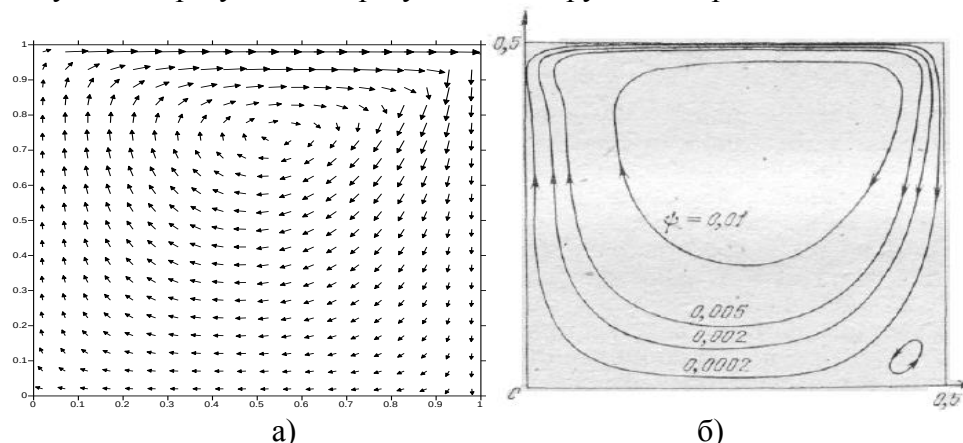


Рис. 3 – Стационарное течение в выемке: а) результаты, полученные при помощи пакета «Композит НК Поток»; б) результаты из работы [6].

На рисунке 3 для сравнения приведены результаты расчётов из работы [6]. Видно, что в целом структура течения в обоих расчётах качественно согласуется. Отличие состоит лишь в том, что на рисунке 3 б в правом нижнем углу заметно вторичное движение в виде небольшого вихря.

В рамках модели вязкой сплошной среды разработан алгоритм расчёта узловых значений скоростей, применение которого показано на решении задачи о течении жидкости в каверне. Исследована зависимость характера течения от коэффициента объёмной вязкости. При стремлении коэффициента объёмной вязкости к бесконечности, поведение жидкости меняется, центр вихря смещается по направлению движения. Наблюдается качественное согласование структуры течения с известными данными, отличие в том, что нет образования вторичного вихря.

Список литературы

1. Аульченко С.М., Васильева Е.И., Каледин В.О. Моделирование ламинарного течения вязкой сжимаемой жидкости при малых скоростях // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2013. №2-1 (54). – С. 170-173.
2. Аульченко С.М., Васильева Е.И., Каледин В.О. Применение метода конечных элементов к решению задачи обтекания профиля крыла ламинарным потоком вязкой несжимаемой жидкости // Научно-технический вестник Поволжья – Казань, 2015. - №1. – С. 42-47.
3. Каледин В.О., Бурнышева Т.В., Равковская И.В., Решетникова Е.В., Седова Е.А., Эптешева С.В., Шпакова Ю.В., Шпаков А.М., Глечиков Д.И., Марченко А.Ю. Композит НК. РОСПАТЕНТ. Свидетельство № 2010611370 от 17.02.2010.
4. Каледин В.О. Концепции языка программирования «Ядро»: метод. указ. / В.О. Каледин // НФИ ГОУ ВПО «КемГУ». – Новокузнецк, 2010. – 47 с.
5. Мирочник Е.А. «Anaglyph» / Е.А. Мирончик // НФИ ГОУ ВПО «КемГУ». – Новокузнецк, 2011.
6. Кускова Т.В. Численное исследование двумерных течений вязкой несжимаемой жидкости / Т.В. Кускова // Некоторые применения метода сеток в газовой динамике. – 1971. – вып. 3.

05.13.00

И.Н. Голяшкова, В.В. Андреев

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики,
кафедра Ядерные реакторы и энергетические установки,
Нижний Новгород, vyach.andreev@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КРИВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-60-62

В статье рассматривается методика прогнозирования гидравлического сопротивления в переходных областях гидравлических кривых. В предлагаемой методике используются результаты обобщения экспериментальных данных, полученных при проливке гидравлических контуров различной степени сложности. Разработанная методика позволяет сократить объем экспериментальных исследований по проливке вновь проектируемых циркуляционных контуров на основе использования полученных обобщенных зависимостей приведенных показателей гидравлического сопротивления.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, гидравлическая кривая, обобщенная зависимость, приведенные параметры, прогнозирование, циркуляционный контур.

При проектировании гидравлических контуров основной задачей является определение гидравлического сопротивления. В простейшем случае - суммарного гидравлического сопротивления циркуляционного контура. При расчете гидравлических сопротивлений сложного контура циркуляции теплоносителя весь контур, условно, разбивается на n конструктивно одинаковых участков. Для каждого из участков определяются все виды сопротивлений. Полное гидравлическое сопротивление будет равно сумме всех сопротивлений по всем участкам. При изменении скорости циркуляции теплоносителя полное гидравлическое сопротивление контура не будет оставаться неизменным. При малых скоростях (наличии естественной циркуляции) реализуется зависимость коэффициентов сопротивления от числа $Re = wd/v$ [1]. Проектирование установок различного назначения и оценка их способности обеспечивать безопасность при эксплуатации в переходных и аварийных режимах требуют учитывать такую зависимость. Наблюдается большое разнообразие кривых гидравлического сопротивления. В зависимости от конкретных условий потеря удельной энергии (напора) происходит по-разному. Гидравлические потери зависят от различных условий.

Определение параметров полной кривой гидравлического сопротивления требует существенных затрат времени и материальных средств. Поэтому целесообразна разработка методов ускоренного построения кривых гидравлического сопротивления, в том числе в областях с малыми значениями чисел Рейнольдса.

Многочисленные экспериментальные результаты, полученные различными авторами, например, [2,3] побуждают к выполнению работ по созданию метода прогнозирования показателей гидравлического сопротивления в циркуляционных контурах на основе обобщения таких экспериментальных данных.

Анализ характерных участков на кривых гидравлического сопротивления, построенных в логарифмических координатах позволяет выявить несколько параметров, которые могут быть использованы для разработки метода прогнозирования по аналогии с [4]. В работе [5] приведены формулы для расчета приведенных показателей сопротивления усталости – приведенного полного гидравлического сопротивления контура циркуляции и приведенного числа Рейнольдса, а также угла наклона кривой гидравлического сопротивления к оси чисел Рейнольдса в случае представления ее в системе логарифмических координат. Расчет этих

приведенных показателей гидравлического сопротивления для большого количества гидравлических кривых с последующим представлением результатов расчета в трехмерном пространстве, образованном координатными осями вдоль которых отложены полученные значения приведенных показателей гидравлического сопротивления, позволяет получить обобщенную зависимость приведенных показателей гидравлического сопротивления.

Выявление такой зависимости позволяет разработать метод ускоренного определения отдельных участков гидравлических кривых. С использованием результатов проливки контура циркуляции, выполняется экспериментальная оценка положения того участка кривой гидравлического сопротивления для которого характерны сравнительно меньшие значения чисел Рейнольдса. При построении этого участка кривой гидравлического сопротивления в логарифмической системе координат можно определить величину угла наклона кривой к оси чисел Рейнольдса. По его значению возможно определение на обобщенной зависимости приведенных параметров гидравлического сопротивления - приведенного полного гидравлического сопротивления контура циркуляции и приведенного числа Рейнольдса. Три найденных приведенных параметра могут быть преобразованы в показатели кривых гидравлического сопротивления с использованием операции обратного преобразования. Последовательность операций по такому “восстановлению” искомых значений показателей гидравлического сопротивления аналогична той, что рассмотрена в [4, с. 35].

Результат прогнозирования гидравлической кривой целесообразно проверить затем с использованием ограниченных по объему испытаний по проливке контура циркуляции. Экспериментальное подтверждение спрогнозированного значения показателей гидравлического сопротивления, при которых гидравлическая кривая переходит в правый практически горизонтальный участок, позволяет сократить объем и продолжительность экспериментальных работ.

В таблице 1 представлены результаты расчёта приведённых показателей гидравлического сопротивления для нескольких экспериментально полученных гидравлических кривых ($\zeta_{пр.}$ – приведённого сопротивления, $Re_{пр.}$ – приведённого числа Рейнольдса и $tga_{пр.}$ - приведённого угла наклона кривой гидравлического сопротивления к оси чисел Рейнольдса). Данные, представленные в таблице, получены для следующих гидравлических кривых: Чусов И.А., (точки 7 - 9) [6], Идельчик И.Е. (точка 10) [2, с. 62], данные по проливке различных по сложности контуров циркуляции, полученные авторами в лабораторных условиях (точки 1-6, 11) [5, с. 44].

После преобразования, результаты экспериментального определения показателей гидравлического сопротивления были представлены в форме участка обобщенной зависимости приведенных показателей гидравлического сопротивления на рисунке 1.

Таблица 1 – Результаты обработки кривых гидравлического сопротивления

№ точки	$\zeta_{пр.}$	$Re_{пр.}$	$tga_{пр.}$
1	0,3705	0,6294	0,00004
2	0,1488	0,8512	0,00007
3	0,0317	0,9683	0,00040
4	0,0999	0,9000	0,00026
5	0,2729	0,7207	0,00015
6	0,8599	0,1400	0,00001
7	0,6089	0,3910	0,00159
8	0,5852	0,4148	0,00233
9	0,4376	0,5624	0,00366
10	0,6167	0,3833	0,00649
11	0,3121	0,6879	0,08567

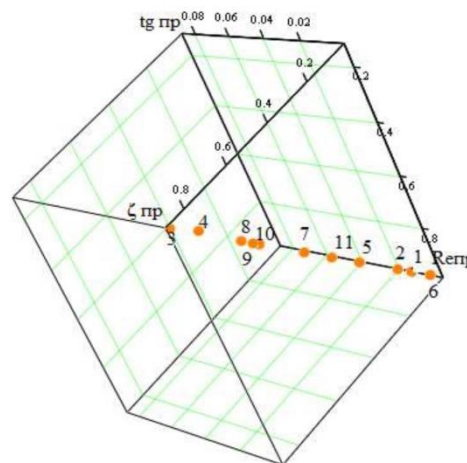


Рис. 1 – Участок зависимости приведённых показателей гидравлического сопротивления

Проверка точности прогнозирования была выполнена с использованием одной из экспериментальных кривых гидравлического сопротивления, не использованной при построении обобщенной зависимости приведенных параметров гидравлического сопротивления. Сопоставление прогнозируемого положения кривой гидравлического сопротивления и кривой гидравлического сопротивления, полученной экспериментально, позволило оценить точность прогнозирования. Ошибка в определении величины полного гидравлического сопротивления контура в области турбулентного режима течения жидкости составила порядка 9,5%.

Повышение точности предлагаемой методики может быть достигнуто за счет рассмотрения большего количества экспериментальных результатов и их совместного учета в рамках обобщенной зависимости приведенных показателей гидравлического сопротивления.

Список литературы

1. П.Л.Кириллов, В.П.Бобков, А.В.Жуков, Ю.С. Юрьев. Справочник по теплогидравлическим расчётам в ядерной энергетике. Том 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. - М.: ИздАт, 2010.-С. 156.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 3-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение. 1992. – 672 с.
3. А.Д. Альтиуль. Гидравлическое сопротивление. – 2- е изд., перераб. и доп.- М.: Недра. 1982. – 224 с.
4. В.В. Андреев. Предел выносливости металлов на обобщённой зависимости приведённых параметров сопротивления усталости. Нижегород. гос. техн. ун-т. Н.Новгород. 2003. – 304 с.
5. Голяшкова И.Н., Андреев В.В. Обобщённая зависимость приведённых характеристик гидравлического сопротивления. XXII Нижегородская сессия молодых учёных. Технические науки. ТомII. Княгинино: НГИЭУ. 2017. – С. 43.
6. Е.Ф.Авдеев, И. А.Чусов, В.А.Левченко, Ю.Д.Левченко, Ю.С.Юрьев. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления модели корпусного реактора// Ядерная энергетика. -2005. - №4. - С. 77-85.

05.13.18

В.М. Градов д.т.н., И.А. Желаев, С.С. Коробков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
кафедра Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии,
Москва, gradov@bmstu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКАХ ИЗЛУЧЕНИЯ С КСЕНОНОВЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-63-66

На основе реалистичной математической модели ксенонового источника излучения выполнено исследование временных зависимостей тока, напряжения на конденсаторе и на разрядном промежутке, спектральных распределений энергии излучения и долей излучения в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Результаты моделирования и измерений находятся в удовлетворительном согласии при длительностях импульса, начиная от 100-120 мкс.

Ключевые слова: *математическое моделирование, спектр, КПД излучения, оптические свойства.*

Разрядные источники излучения высокого давления лампового типа применяются в различной облучательной технике и технологиях, основанных на фотолюминесцентных, бактерицидных и фотохимических свойствах света [1-4]. При этом остается много вопросов, связанных с выбором оптимальных параметров и режимов работы излучателей применительно к конкретным задачам. Практикой доказано, что серьезным инструментом при интерпретации данных эксперимента и в качестве хорошего прогностического средства выступает математический эксперимент. В настоящей работе ставится задача экспериментальной проверки работоспособности модели ксеноновых трубчатых разрядных ламп высокого давления в составе разрядного контура. На входе задаются геометрические, физические и электрические параметры источника, а на выходе получается полный комплекс всех характеристик, включая спектральное распределение излучения. Источники работают в импульсно-периодических режимах с воздушным охлаждением, оболочка выполнена из кварца или сапфира.

Математическая модель в развитие результатов [4] учитывает лучистую эмиссию плазмы в подавляющем большинстве линий атомов на непрерывном фоне, газодинамические процессы в разряде, внешний электрический контур, включающий емкость, индуктивность и активное сопротивление. Решается сопряженная задача радиационно-кондуктивного теплообмена в системе плазма-полупрозрачная оболочка. Для плазмы используется приближение локального термодинамического равновесия (ЛТР). Модель включает уравнения сохранения энергии в плазме и стенках, неразрывности, движения, переноса излучения в приближении Шустера - Шварцшильда, уравнения разрядного контура, с соответствующими начальными и краевыми условиями [4,5].

Система дифференциальных уравнений решается численными методами конечных разностей [6]. Разностные схемы строятся интегро-интерполяционным методом, для уравнения энергии получена двухслойная консервативная однородная неявная разностная схема квазилинейного типа. Система квазилинейных разностных уравнений решается итерационно последовательными прогонками. Оценки аппроксимации, устойчивости и сходимости разностных решений выполнены согласно [8]. При решении электротехнических уравнений внешней цепи применяются неявные схемы типа схем трапеций или Гира, т.к. данная система уравнений на переднем фронте импульса тока оказывается жесткой.

Моделирование требует обширной базы данных по термодинамическим, теплофизическим и оптическим свойствам плазмы и материалов оболочек (кварц, сапфир). В настоящей работе исследования основываются на теоретико-алгоритмическом и программном обеспечении базы данных [4]. Ввиду того, что в модели необходима точная привязка всех материальных функций уравнений к температуре и давлению плазмы, а спектрального коэффициента поглощения еще и к частоте излучения, большая часть свойств получена расчетным путем. Все методики расчета отработаны на широкой номенклатуре плазмообразующих сред (инертно- и металлогазовых смесей [4, 6, 7]).

При расчете коэффициента поглощения учитываются фотоионизация атомов и ионов, торможение электронов в полях нейтралов и ионов, дискретные переходы связанных электронов [8]. Данные по структуре уровней энергии ксенона и набору линий заимствуются из [9,10]. Наибольший вклад в суммарный коэффициент поглощения вносит фотоионизационная составляющая, которая вычисляется непосредственным суммированием по уровням тонкой структуры. Свободно - свободные переходы электронов в полях ионов учитываются с помощью кси-фактора Бибермана с введением фактора Гаунта [8]. Рассматривается также поглощение, связанное с обратным тормозным эффектом в полях нейтральных частиц. Линейчатый спектр формируется в результате перекрытия крыльев линий, уширенных различными механизмами - штарковским электронами и ионами, резонансным, доплеровским, вандерваальсовским. Ударные штарковские ширины линий вычисляются в соответствии с нестационарной теорией Собельмана - Вайнштейна [11]. В работе принята процедура прямого интегрирования спектров по частоте, при этом количество спектральных интервалов доходит до 1000.

В экспериментах, выполненных в настоящей работе с целью получения точного и полного набора входных данных для проведения вычислительных экспериментов и последующего анализа точности моделей, измеряются следующие характеристики источника излучения и разрядного контура, имеющего в составе плазменную нагрузку (лампу), дроссель, импульсный трансформатор, основной накопительный конденсатор: зависимости от времени тока и напряжений на лампе и на основном накопительном конденсаторе в процессе его разряда. яркостные характеристики излучения лампы и интегральный выход излучения в процессе разряда, спектр излучения лампы в диапазоне 200-1000 нм. Для измерений временного хода напряжений на конденсаторе и на лампе применяется высоковольтный пробник Pintek HVP-39PRO. Измерения разрядного тока проводятся с использованием датчика Pearson (модель 4418). Сопротивления и индуктивности проводов и дросселя с импульсным трансформатором определяются при помощи мостового измерителя LRC импеданса UT -612 (UNI-T). Измерение излучательных характеристик проводятся при помощи мультиспектрального фотоэлектрического преобразователя "СПЕКТР-01" в диапазоне 200-1000 нм. Все натурные и вычислительные эксперименты проводились при внутреннем радиусе разрядной трубки $R=0.35$ см, межэлектродном расстоянии $l=12$ см, давлении наполнения ксенона $p_0=0.036$ МПа.

Энергетическим параметром, определяющим характеристики источников излучения, является средняя удельная электрическая мощность $\langle w \rangle$, представляющая собой отношение энергии, запасенной в конденсаторе, к объему разрядного канала и времени импульса на уровне 035 от максимального значения тока. Из рис.1 следует, что расчетные и экспериментальные данные по зависимостям от времени тока, напряжений на конденсаторе и разрядном промежутке совпадают в пределах 8-12%. Такой же уровень точности расчета сохраняется и при других мощностях до 500 кВт/см^3 и длительностях, начиная от 100-120 мкс и выше. При наличии дежурной дуги, обеспечивающей более стабильное развитие разряда, модель работает и при меньших длительностях разряда. Следует отметить, что соответствие расчета и эксперимента имеет место, несмотря на то, что начальный этап развития разряда модель описывает достаточно приближенно, из-за неопределенности места инициирования разряда и сложной не до конца изученной газодинамической картины явлений, сопровождающих эту стадию. При этом видно (кривая 3, точки б), что на начальном временном отрезке расчетная

зависимость напряжения U_p качественно правильно передает развитие процесса.

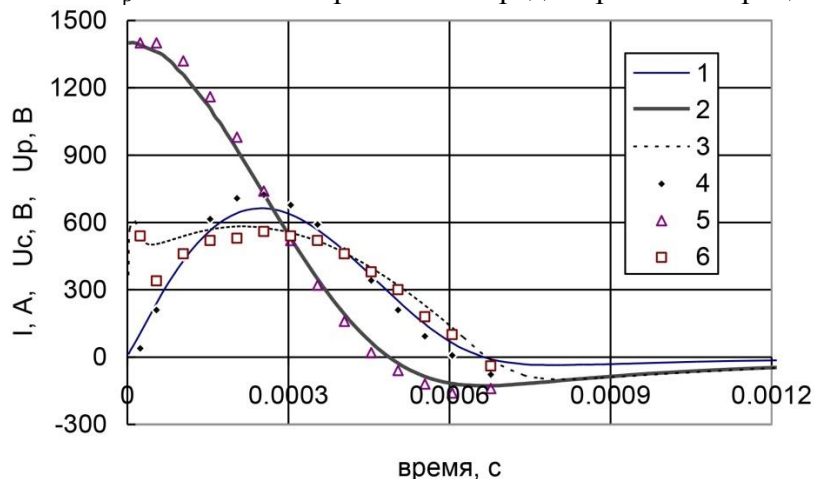


Рис. 1- Зависимость электрического тока I (1,4), напряжения на конденсаторе U_c (2, 5) и напряжения на разрядном промежутке U_p (3, 6) от времени. Начальное напряжение на конденсаторе $U_0=1400$ В, емкость конденсатора $C=166$ мкФ, индуктивность контура $L_k=187$ мкГн, активное сопротивление контура $R_k=0.252$ Ом. 1-3 – расчет, 4-6 – эксперимент. $\langle w \rangle = 77$ кВт/см³.

На рис.2 представлен КПД в двух спектральных интервалах в функции от $\langle w \rangle$. Данные расчета относятся к внутренней поверхности разрядной трубки. В ультрафиолетовой области (УФ) (кривые 1,2) расхождение расчета и эксперимента больше, чем для ближней инфракрасной (кривые 3,4), причем в обоих случаях расчетная кривая идет в целом выше экспериментальной. Это связано с поглощением излучения кварцевым стеклом, которое нарастает в коротковолновую сторону. В УФ - диапазоне кроме того, возможно наведенное поглощение кварца. Характер зависимости кривых от $\langle w \rangle$ соответствует поведению функции Планка и коэффициента поглощения плазмы в диапазоне 180-400 нм с ростом средней температуры. В ближней инфракрасной области по мере роста коэффициента поглощения линейчатый спектр растворяется на непрерывном фоне и дискретная структура эмиссии в области 700-1100 нм нивелируется, хотя в поглощении линии по-прежнему существуют.

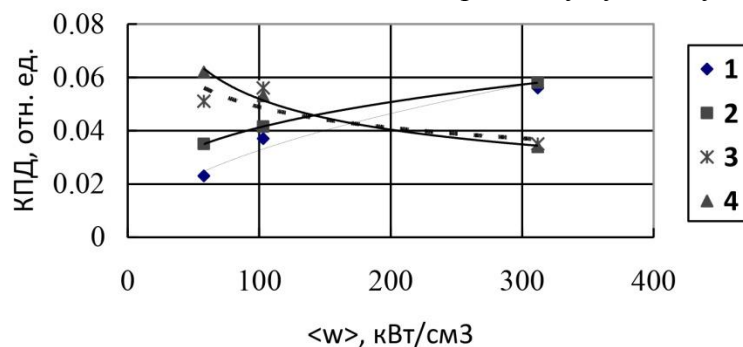


Рис. 2- Зависимость КПД в отдельных спектральных интервалах от удельной электрической мощности.

Параметры источника излучения: $C=198$ мкФ, $L_k=88$ мкГн, $R_k=0.083$ Ом, Обозначения даны в подписи к рис.1

1,2 - 245-295 нм, 3,4 - 935-1065 нм 1,3-эксперимент, 2,4-расчет

На рис.3 проведено сопоставление спектральных распределений КПД, полученных в настоящей работе и в [12]. Потери в контуре приняты равными 10%, как в [12]. Видно, что в целом модель реалистично отражает ход кривой спектрального распределения. Это касается и областей непрерывного спектра 250-400 нм и 500-700 нм, и областей, насыщенных линиями. Отметим, что если наблюдать временную динамику спектрального распределения мощности излучения, то картина сильно меняется в течение импульса, когда линии постепенно исчезают на усиливающемся непрерывном фоне.

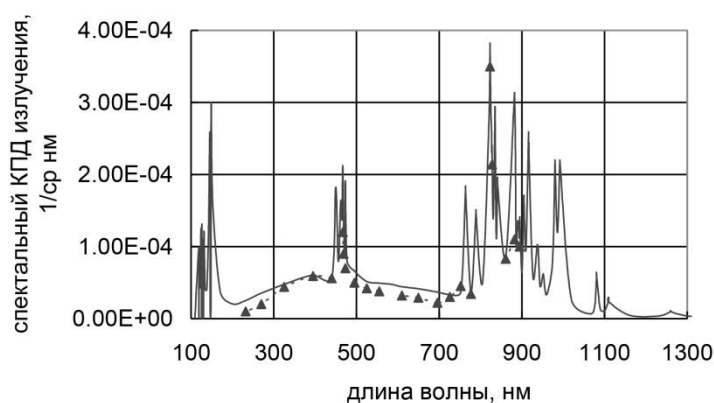


Рис.3- Спектральное распределение КПД излучения.

$\langle w \rangle = 26 \text{ кВт/см}^3$. Лампа типа ИФП-1200. $R=0.35$, $l=12 \text{ см}$, $p_0=0.036 \text{ МПа}$, $U_0=1100 \text{ В}$, $C_k=200 \text{ мкФ}$, $L_k=1000 \text{ мкГн}$, $R_k=0.2 \text{ Ом}$, $I_0=1 \text{ А}$. Сплошные линии- расчет, точки-эксперимент [12]

В УФ- области за границей пропускания кварца вид спектров становится еще более сложным из-за автоионизационных линий и наложения полос молекулярного ксенона.

Таким образом, выполненное теоретическое и экспериментальное исследование электрофизических и радиационных характеристик источника излучения вместе с ранее проведенными исследованиями [4,5] свидетельствуют о реалистичности обсуждаемой модели и правильности разработанных в ходе ее реализации методов и алгоритмов. Соответствующий программный комплекс может служить рабочим инструментом для решения задач совершенствования и разработки ламп различного назначения, а также осветительных и облучательных систем на их основе.

Список литературы

1. Hancock P., Curry R.D., K.F. McDonald, L. Altgilbers. Megawatt, Pulsed Ultraviolet Photon Sources for Microbial Inactivation. IEEE Transactions on Plasma Science. V. 32. No.5. 2004. P. 2026 -2031.
2. Moreau. M., Lescure G., Agoulon A., Svinareff P., Orangea N., Feuilloley M. Application of the pulsed light technology to mycotoxin degradation and inactivation J. Appl. Toxicol. 2011, DOI 10.1002/at. 1749
3. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана. 2014.396 с.
4. Градов В.М. Разработка методов расчета и исследование радиационных процессов в системах с разрядными источниками селективного излучения: Дис.... д-ра техн. наук / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2002. -323 с.
5. Градов В.М., Гавриш С.В., Рудаков И.В. Моделирование электрофизических процессов в импульсно-периодических трубчатых источниках мощного инфракрасного излучения с сапфировыми оболочками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. №6. С.130-145. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-130-145
6. Калиткин Н.Н. Численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2011.592 с.
7. Градов В.М., Зимин А.М., Преображенский В.А. Расчет предельных энергий импульсных газоразрядных ламп // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1981. Т.8. №2. С.134-142.
8. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М: Физматлит, 2008.656 с.
9. Atomic Spectra Database. NIST. URL:<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database> (дата обращения 25.09.17).
10. Saloman E.B. Energy Levels and Observed Spectral Lines of Xenon, Xe I through Xe LIV// J. Phys. Chem. Ref. Data. -2007. - V.33, №3. - P.765-843.
11. Вайнштейн Л.А., Собельман И.И., Юков Е.А. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М.:Наука. Гл.ред.физ.-мат. лит, 1979. 319с.
12. Маршак И.С. Импульсные источники света. М.:Энергия, 1978.472 с.

05.13.18

В.М. Градов д.т.н., И.А. Желаев, С.С. Коробков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
кафедра Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии,
Москва, gradov@bmstu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ОБОЛОЧЕК ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-67-69

Методами математического моделирования получены данные о структуре баланса мощности потерь на оболочке разрядного ксенонового источника излучения в процессе развития разряда. Исследованы температурные поля в стенке в зависимости от времени в течение импульса, энергии разряда, частоты следования импульсов. Делаются выводы о работоспособности источников излучения в контексте обеспечения основных эксплуатационных характеристик: предельной энергии и долговечности.

Ключевые слова: математическое моделирование, температура оболочек, потери энергии на стенке, периодический режим, разряд.

Источники излучения с инертным наполнением, применяемые в различных системах [1], а также технологиях, использующих фотохимическое, фотобиологическое действия света [2,3], могут работать в нескольких режимах: стационарном, моноимпульсном и периодического следования импульсов. Две важнейшие характеристики источников во всех этих режимах - предельная энергия и долговечность во многом определяются температурным состоянием оболочек, стабилизирующих разряд. От распределения и уровня температурных полей зависят прочностные свойства оболочек из кварца или сапфира, прозрачность и радиационная устойчивость материалов. Например, в диапазоне температур 1300-1500К начинается интенсивная кристаллизация кварца. Поэтому прогнозирование теплового режима оболочек имеет большое значение при разработке и совершенствовании ламп под конкретные задачи.

Трудность расчета динамики температурных полей в стенках связаны прежде всего со сложностью определения тепловых нагрузок на стенку. Имеющиеся экспериментальные данные по энергетическим потерям на оболочке имеют большой разброс значений у разных авторов, кроме того, в импульсных режимах в литературе приводятся только интегральные за импульс значения, вдобавок ко всему не разделяются составляющие потерь, связанные с поверхностными потоками тепла и объемным поглощением излучения материалом стенки. Вместе с тем, суммарный тепловой поток F_{Σ} , нагружающий внутреннюю поверхность оболочки, складывается из потоков излучения в двух спектральных областях за коротковолновой F_1 и длинноволновой F_2 границами пропускания материала (для кварца 0.22 и 3.0 мкм, соответственно) и потока за счет теплопроводности плазмы F_T . Понятно, что чисто экспериментальным путем закрыть проблему баланса энергии на стенке весьма сложно.

В настоящей работе предлагается решение данной задачи путем моделирования процессов в разряде и оболочках в рамках сопряженной задачи радиационно-кондуктивного теплообмена в системе плазма - полупрозрачная оболочка (или несколько оболочек). При этом в импульсно-периодических режимах, являющихся предметом исследования данной работы, требуется рассматривать выход на установившийся режим, продолжающийся в диапазоне рассмотренных частот $f=0.5-16$ Гц на протяжении 50-1500 импульсов.

Математическая модель системы разряд-стенка включает уравнения энергии для разряда и стенки, уравнение переноса излучения в разряде и нагретых стенках, уравнения разрядного контура, включающего конденсатор, индуктивность, активное сопротивление и источник излучения и ряд дополнительных соотношений [4,5]. Интегральная по спектру дивергенция

лучистого потока рассчитывается на основе прямого интегрирования спектрального уравнения переноса излучения по длине волны и пространству в цилиндре. Интегрирование проводится по всем направлениям в пределах угла 4π стерadian в каждой радиальной точке для каждой длины волны. На наружной поверхности сброс тепла осуществляется за счет излучения за длинноволновой границей пропускания материала стенок и конвекции с коэффициентом теплоотдачи α . Объемное поглощение и излучение материала оболочки учитывается в дивергенции лучистого потока.

Информационное оснащение вычислительных экспериментов, включая температурную зависимость спектрального коэффициента поглощения материала стенок, и программно-алгоритмическая реализация модели обсуждается в [5]. Зависимость коэффициент теплопроводности и теплоемкости кварца от температуры такая же, как в [6].

Вычислительные эксперименты проводились при внутреннем радиусе разрядной трубки $R=0.35$ см, межэлектродном расстоянии $l=12$ см, толщине стенки 0.1 см, давлении наполнения ксенона $p_0=0.036$ МПа, емкости конденсатора $C=198$ мкФ, индуктивности контура $L_k=88$ мкГн, активном сопротивлении цепи $R_k=0.083$ Ом. Варьировались энергия, запасенная в конденсаторе W_0 , и частота импульсов. В качестве материала оболочки служил кварц. Охлаждение источника происходит в условиях естественной конвекции в открытом пространстве.

В течение импульса имеет место перераспределение мощности потерь на стенках между отдельными составляющими. Основным фактором теплового нагружения является коротковолновый поток излучения F_1 , который во многом формируется крыльями резонансных линий (рис.1). В максимуме на 280 мкс доля этой составляющей в общем потоке достигает до 80%. При этом средняя температура плазмы $\langle T \rangle$ и температура на оси разряда T_0 составляют 12020 и 12560 К (соответственно), а температура внутренней поверхности стенки 1790 К. Доля потоков F_2 и F_T не превышает 10-15% в общем потоке. На рис.1 видно, как после прохождения импульса и затухания разряда основным фактором тепловой нагрузки становится поток за счет теплопроводности.

В установившемся режиме импульсно-периодического разряда температура на наружной поверхности стенки практически не меняется от импульса к импульсу, тогда как температура внутренней поверхности T_1 может при малых частотах колебаться с большой амплитудой (рис.2). Например, при частоте 0.42 Гц размах колебаний составляет 700 К, при 3.34 Гц - 620 К. Заметим, что максимумы температуры $T_1=1780$ К и температур плазмы $\langle T \rangle=12480$, $T_0=14080$, давления в разряде 1.74 МПа и электрического тока 1800 А достигаются в разные моменты времени: 275, 204, 94, 214 и 184 мкс, соответственно. С увеличением частоты момент времени достижения максимума температуры T_1 меняется мало.

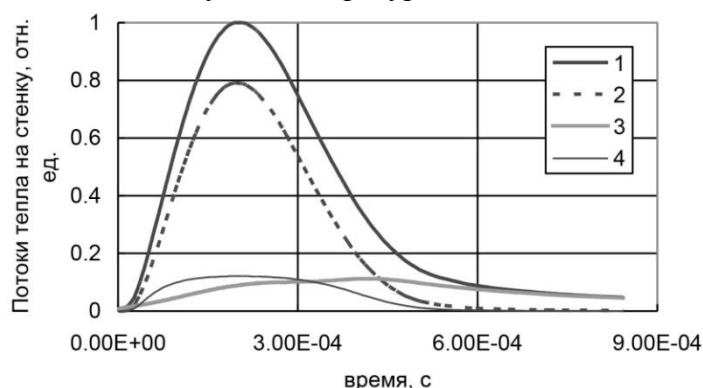


Рис. 1 Зависимость составляющих потерь мощности на стенке от времени импульса относительно максимального значения F_{Σ} . $W_0=480$ Дж, 1 - F_{Σ} , 2 - F_1 , 3 - F_T , 4 - F_2

Для энергии $W_0=480$ Дж перепад температур по толщине стенки в установившемся режиме перед началом импульса при $f=0.42$ Гц и средней электрической мощности $P_s=200$ Вт составляет 4 К, а при 3.34 Гц и $P_s=1600$ Вт - 25 К. В максимуме температуры стенки эти перепады возрастают при указанных P_s до 256 и 647 К, соответственно.

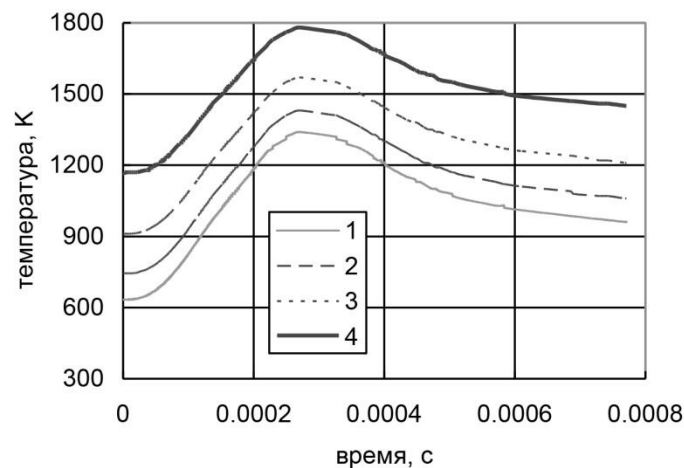


Рис. 2 Зависимость температуры T_1 от времени в течение импульса $W_0=480$ Дж, частота f равна: 1 - 0.42, 2 - 0.84, 3- 1.67, 4- 3.34 Гц

При меньших значениях энергии W_0 , например, 100 Дж перепад температур перед началом импульса при $f=2$ Гц и $P_s=200$ Вт составляет те же 4К, а при частоте 16 Гц и $P_s=1600$ Вт - 34 К. В максимуме же температуры при $P_s=200$ Вт перепад температур заметно меньше, чем для $W_0=480$ Дж и равен 128 К, а при $P_s=1600$ Вт - 139 К.

Температурный перепад определяет термостойкость оболочки. Для кварца допустимые значения перепадов находятся в пределах 800-1000 К [6], т.е. рассмотренные режимы работы источников вполне работоспособны. В то же время при энергии импульса 480 Дж при f выше 0.4 Гц максимальная температура стенки попадает в неблагоприятный для кварца диапазон 1300-1500 К, в котором кристаллизационная устойчивость резко снижается. Однако, этот диапазон проходится достаточно быстро (для самого жесткого режима рис.2 время прохождения данного диапазона на переднем фронте импульса составляет около 60 мкс, на заднем - почти 2.9 мс), при этом средняя температура не превышает 1200 К, т.е. все рассмотренные режимы оказываются рабочими.

Таким образом, в статье на основе замкнутого расчета системы разряд-стенка получены данные, имеющие значения для прогнозирования предельных энергий и долговечности источников излучения на ксеноне в режимах периодического следования импульсов.

Список литературы

1. Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Боровкова Т.В., Павлова Я.М. Термостойкость оболочек газоразрядных трубчатых водоохлаждаемых источников излучения при нестационарном режиме работы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. №2. С.45-59. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-26-45-59
2. Hancock P., Curry R.D., K.F. McDonald, L. Altgilbers. Megawatt, Pulsed Ultraviolet Photon Sources for Microbial Inactivation. IEEE Transactions on Plasma Science. V. 32. No.5. 2004. P. 2026 -2031.
3. Abida J., Rayees B., Masoodi F. A. Pulsed light technology: a novel method for food preservation. Int. Food Res. J. V.21. No.3. 2014. P.839-848.
4. Градов В.М., Иванов В.В., Терентьев Ю.И., Щербаков А.А. К теории мощного нестационарного ксенонового разряда с учетом испарения стабилизирующих его стенок // ТВТ. 1981. Т.19. №1. С.28 -35.
5. Градов В.М., Гавриш С.В., Рудаков И.В. Моделирование электрофизических процессов в импульсно-периодических трубчатых источниках мощного инфракрасного излучения с сапфировыми оболочками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. №6. С.130-145. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-130-145
6. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 396 с.

05.13.06

И.Р. Давлетшин, Л.А. Симонова, В.В. Абрамова

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Набережночелнинский институт (филиал), кафедра автоматизации и управления,
Набережные Челны, ildar_davletshin@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ НАДСТРОЙКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-70-73

В статье описана принципиальная структурная модель интеллектуальной информационной системы управления технологическим процессом. Система управления состоит из трех уровней: первые два - традиционные для систем управления, третий - интеллектуальная надстройка. Последний уровень берет на себя функции эксперта/оператора. База знаний надстройки формируется на основе многоагентной системы и базы прецедентов (готовых сценариев работы системы). В систему входят агенты двух типов: первые работают на основе нечеткой логики, а вторые на основе нейронной сети.

Ключевые слова: *многоагентная система, нейронная сеть, искусственный интеллект, интеллектуальная надстройка, нечеткая логика, база прецедентов.*

Сегодня перед разработчиками систем автоматизированного управления стоит сложная задача перехода на безлюдную технологию с принятием решения в автоматическом режиме в условиях неопределённости. Анализ систем управления технологических процессов предприятий показывает, что в настоящий момент они не позволяют выполнять данные задачи, т.к. не имеют элементов искусственного интеллекта (ИИ). [1]. SCADA-системы, управляющие технологическим процессом, позволяют поддерживать технологический процесс в типовых ситуациях. В этих системах все нештатные ситуации разрешаются оператором.

Разработки по искусственному интеллекту ведутся в двух направлениях: естественном и социальном. К естественному направлению относят искусственные нейронные сети (ИНС), алгоритмы генетического поиска, алгоритмы муравьиной колонии и другие [2]. К социальному направлению относятся многоагентные системы [3].

Преимуществом многоагентных систем является отсутствие ограничений накладываемых на природу агента. Он может представлять собой программный модуль, электронный или физический механизм. Эта особенность позволяет объединять при создании интеллектуальной надстройки системы управления разные методы эмуляции ИИ.

Например, за хранение известных экспертам закономерностей и правил могут отвечать агенты, работающие на нечеткой логике (АНЛ), за самообучение и выработку рекомендаций в нетипичных ситуациях – агенты, работающие на нейронных сетях (АНС).

В производстве необходимо обеспечение требуемого качества продукции при минимальных затратах с учетом решения ряда задач в условиях неопределенности. Структурная модель системы управления технологическим процессом представлена на примере изготовления строительных материалов (рисунок 1).

Предлагаемая система управления технологическим процессом включает в себя три уровня. Нижний уровень представляет собой набор исполнительных механизмов (здвижки, заслонки, пневмоцилиндры, двигатели и приводы) и датчиков обратной связи. Второй уровень представляет собой Scada-систему, включающую в себя сервер Scada, интерфейс (рабочее место) оператора, серверы баз данных системы. Третий уровень представляет собой интеллектуальную надстройку, построенную на основе многоагентной системы.

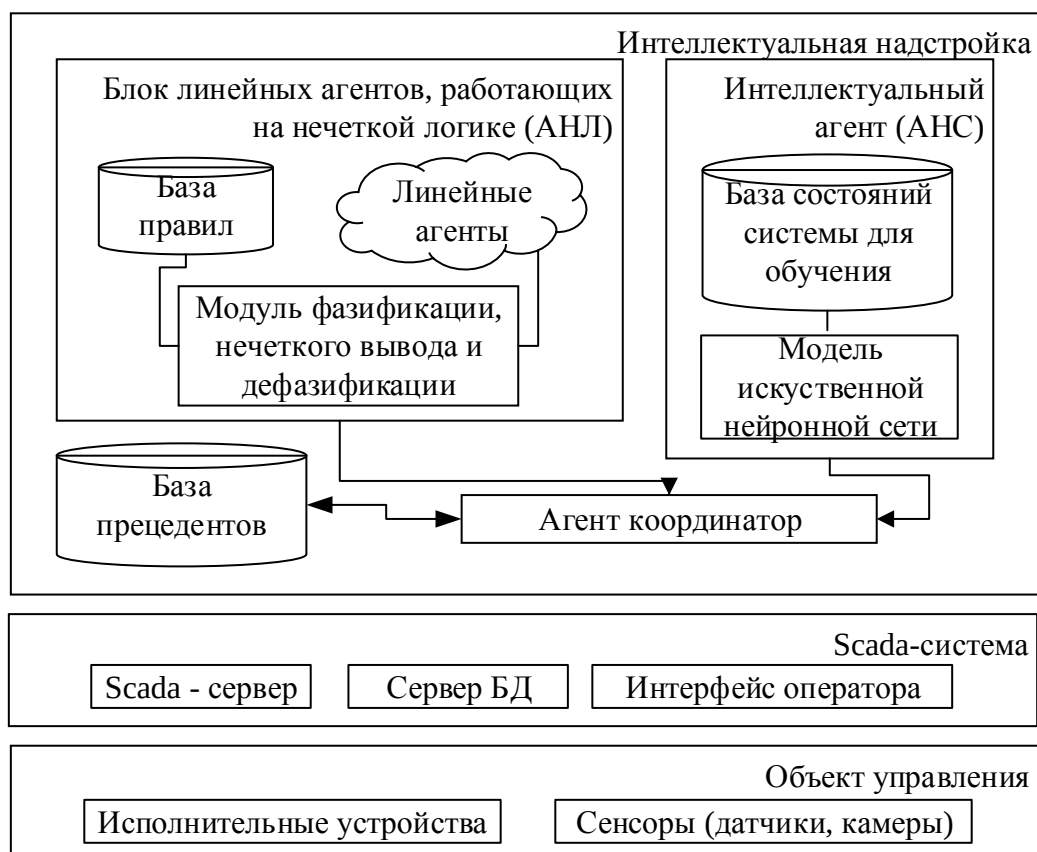


Рис. 1- Структура системы управления

Систему разбили на четыре блока:

1. *Блок линейных агентов работающих на нечеткой логике.* Знания агентов представлены в виде базы продукционных правил. Каждый агент последовательно выполняет: преобразование четких значений к нечетким переменным; нечеткий логический вывод; обратное преобразование нечетких переменных вывода к четким значениям [4]. База нечетких правил, с которой они взаимодействуют, наполняется экспертом-технологом.

2. *Блок интеллектуальных агентов, работающих на нейронных сетях.* В основу агента заложена модель искусственной нейронной сети, он непрерывно считывает состояние системы и обучается.

3. *База прецедентов.* В этой базе хранятся эталонные наборы параметров технологического процесса по каждой операции.

4. *Агент координатор.* Высокоуровневый агент руководящий всем процессом. Этот агент обращается к имеющимся в его распоряжении агентам, переключает управление с одного на другой, работает с базой прецедентов.

Эффективность подобных трехуровневых систем подтверждается испытаниями на технологическом оборудовании [5]. На основе данной надстройки предложено расширить возможности системы и ускорить процесс обработки информации за счет применения интеллектуального агента (ИНС).

Разработанный алгоритм работы системы управления рассмотрен на примере автоматической линии по производству минеральной ваты (рисунок 2).

В систему на первом этапе поступает информация о запуске или переналадке на новый вид продукции. В системе в соответствии с имеющимися у неё данными спецификаций выпускаемых номенклатур формирует два множества:

Множество $TN = (TN\ 1, TN\ 2, \dots, TNn-1, TNn)$, где TN - конкретный качественный показатель продукта;

Множество $K = (K\ 1, K\ 2, \dots, Kp-1, Kp)$, где K – эталонные параметры на выходе каждой операции производственного процесса.

Далее идет обращение к базе прецедентов, хранящей в себе предустановленные экспертом или добавленные в ходе обучения системы параметры работы.

Прецедент помимо указанных выше множеств параметров содержит третье множество, множество $N = (N_1, N_2, \dots, N_{n-1}, N_n)$, где множество N представляет собой множество эталонных параметров, но уже на входе каждой операции. Прецедентов для одного вида продукции может быть несколько, каждому из них присваивается определенный вес, в соответствии с которым выстраивается очередность применения записанных в них параметров. Идет сопоставление фактических значений на выходе операций с эталонными.

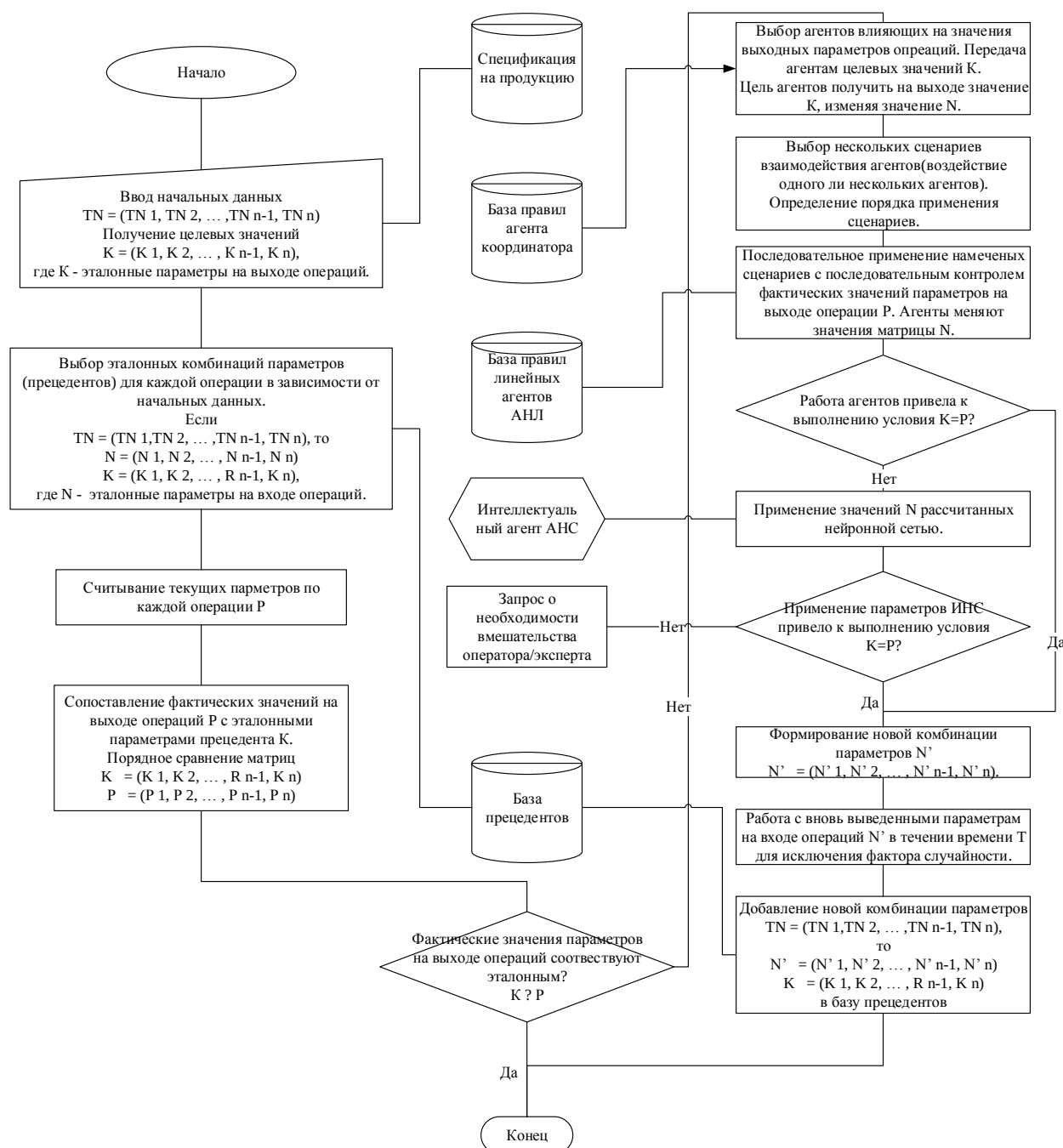


Рис. 2- Алгоритм работы системы управления

В случае равенства множеств цикл заканчивается. В противном случае используется следующий по весу прецедент. Если один из прецедентов сработал, веса всех остальных относящихся к этой продукции пересчитываются.

Если все записанные в прецедентах настройки не позволяют оптимизировать процесс, то идет обращение к линейным агентам. Выполняется поиск агента, отвечающего за определенную операцию и способного обеспечить целевое значение К. Если таких агентов много, то формируется несколько сценариев воздействия с их последовательным применением и контролем реакции объекта управления.

Если настройки рассчитанные агентами также не оптимизировали и не стабилизировали процесс, включается в работу третий модуль - Интеллектуальный агент АНС. Этот агент непрерывно снимает параметры входов и выходов операций. Обучается на них и способен рассчитать необходимое управляющее воздействие с помощью подготовленной за время обучения нейронной сети.

После того как эталонные параметры на выходе операций достигнуты (с помощью работы АНЛ или АНС), все параметры заносятся в базу, формируя новый прецедент. Система обращается за поддержкой к человеку (эксперту или оператору) только если ни один из её блоков не справился с задачей.

Новизна описанной интеллектуальной надстройки заключается в объединении многоагентной системы, нечеткой логики и нейронных сетей, в разработке алгоритма, позволяющего в определенной последовательности работать с выбранным математическим аппаратом и обеспечивать точность принятия решения на определенных этапах в условиях неопределенности.

Список литературы

1. Давлетшин И.Р. Технологический процесс производства минераловатных плит, основы построения интеллектуальной системы управления / И.Р. Давлетшин // IX Камские чтения: всероссийская научно-практическая конференция. – Набережные Челны, 2017. – Ч.1. – С. 101-105.
2. Абрамова В.В. Искусственный интеллект в управлении технологическими объектами / Абрамова В.В. – Набережные Челны: Изд.-полигр. центр Набережночелнинского института (филиал) ФГАОУ ВПО Казанского (Приволжского) федерального университета, 2014. – 26 с.
3. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
4. Чернова М.А., Симонова Л.А., Абрамова В.В. Применение нечеткой логики в системе управления процессами в вакуумно-напылительном технологическом комплексе // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-4. – С. 744-750.
5. Чернова М.А. Применение многоагентной системы для совершенствования управления процессами в вакуумно-напылительном технологическом комплексе // Социально-экономические и технические системы: Исследование, проектирование, оптимизация – 2015. – №4 – С.69.

05.13.01

А.А. Емельянов¹, В.В. Малышев², Нгуен Виет Хоай Нам², А.В. Старков²¹ Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», Москва, eaa@ntsomz.ru² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра «Системный анализ и управление», starkov@goldstar.ru, ngvhoainam@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЗЗ В ЧАСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-74-79

Представлены математические модели основных процессов при моделировании функционирования наземного сегмента обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые могут быть положены в основу специализированного программного обеспечения. Формулируется задача распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям наземной инфраструктуры. Проводится декомпозиция, определяется перечень и формируются модели, объединение которых позволит построить единую математическую модель функционирования наземного сегмента в части распределения целевой информации;

Ключевые слова: математическая модель, обработка данных, ДЗЗ, распределение ресурсов, эффективность, время, стоимость, наземный сегмент.

Введение

Наземный сегмент обработки данных ДЗЗ предназначен для создания и распространения по заявкам потребителей информационных продуктов, которые производятся на базе информации дистанционного зондирования, получаемой с помощью целевой аппаратуры КА российской орбитальной группировки.

В составе орбитальной группировки эксплуатируются КА 4-х типов: "Ресурс-П", "Канопус-В", "Метеор-М", "Электрон-Л".

Наземный комплекс включает пункты приема, обработки и распространения (НКПОР) информации, имеющих разнообразное аппаратно-программное обеспечение. Оперативное управление работой орбитальной группировки и наземной инфраструктуры осуществляет НТЦ ОМЗ - оператор системы [1]. Распределение целевой информации по составным частям наземной инфраструктуры происходит последовательно следующим образом (см. рисунок 1).

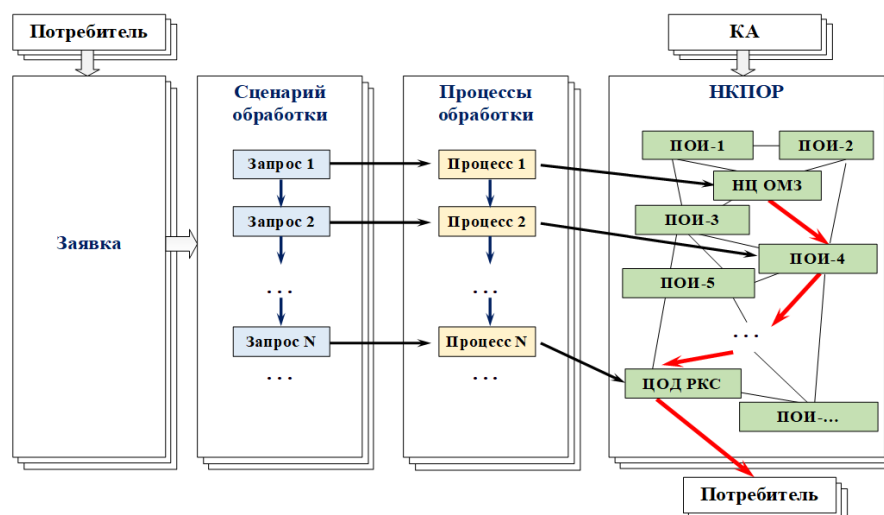


Рис. 1– Последовательность решения задачи

На входе имеется следующая информация:

- перечень и технические характеристики КА,
- перечень и технические характеристики наземной космической инфраструктуры,
- перечень потребителей,
- пропускная способность каналов передачи информации.

Потребители формируют заявки к системе, каждый со своими требованиями и частотой. Заявки разных потребителей образуют входящий поток заявок системы, который является нерегулярным и ординарным. Каждый потребитель характеризуется своей предысторией: числом предыдущих заявок, их суммарным объемом и интенсивностью.

Изначально процессы не распределены по составным НКПОР, но известно, в каких узлах они могут выполняться. Учитывая значительную географическую распределенность элементов инфраструктуры, а также различия в их производительности при решении однотипных задач возникает необходимость в принятии решения об оптимизации работы системы в целом.

Под эффективным целевым функционированием наземного сегмента обработки данных ДЗЗ понимается использование эксплуатационных возможностей группировки КА системы и наземной инфраструктуры для производства совокупности конечных информационных продуктов, наиболее полно соответствующей совокупности заявок потребителей. В качестве показателей эффективности системы в целом можно принять такие интегральные оценки свойств системы как [2]:

- суммарное время обслуживания;
- совокупные затраты на обработку информации (условная стоимость).

При построении математической модели работы наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в ней можно выделить модели основных составляющих [3]:

- модель заявки потребителя,
- модель процесса обработки информации
- модель распределения процессов обработки.

Модель заявки потребителя

Потребители могут отличаться друг от друга по принадлежности к различным организационным типам (государственный сегмент, предприятия, физические лица и т.д.), по областям и конкретным задачам приложения информации об окружающей среде, по характеру требований к информации, по реальному объему потребления информации и потенциалу его расширения и т.п. Модель заявки потребителя должна содержать стандартный перечень данных, на основе которой формируется соглашение об уровне обслуживания (SLA-соглашение), включающее в себя [2]:

- географическое расположение потребителя,
- тип(ы) аппаратуры наблюдения,
- список процессов обработки и их последовательность,
- географическое расположение районов,
- приоритет.

SLA-соглашение позволяет сформировать набор последовательных запросов к системе, составляющих сценарий обработки заявки. В свою очередь, каждому запросу из сценария соответствует свой вычислительный процесс обработки. Процесс может реализовывать [2]:

- решение вычислительной задачи,
- сохранение обработанных данных,
- передачу данных между пунктами обработки информации (ПОИ).

Поскольку выполнение заявки потребителя зависит не только от параметров космического сегмента, но и от параметров наземной системы, то очень важно в модели заявки потребителя учитывать только основные требования потребителя, оказывающие на качество выполнения (можно как проще, но достаточно).

Модель процесса обработки информации

Модель процесса обработки информации можно разделить на два составляющие: космический сегмент и наземной сегмент.

Космический сегмент играет роль функции начальной генерации информации, на выходе которого имеется объем информации, зависящий от параметров заявки (см. рисунок 2).

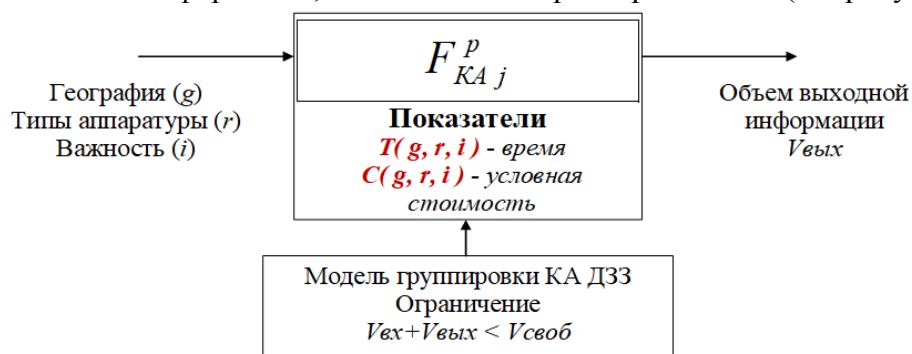


Рис. 2– Модель процесса обработки информации (космический сегмент)

Процесс обработки информации в космическом сегменте при ее моделировании можно разбить на три стадии [4]. Вначале на основе требований заявки выбирается часть спутниковой группировки, в которой задача съемки информации может быть выполнена. Затем происходит моделирование процесса съемки района(ов) с учетом ограничения параметров космической группировки. На последней стадии определяются условные показатели времени и стоимости, а так же объем информации для передачи на возможные наземные пункты.

На данном этапе используются следующие модели: модель спутниковой группировки, модель эволюции спутниковой группировки, модель наземных пунктов.

В модель спутниковой группировки на сегодняшний день имеются следующие КА: «Электро-Л» №1, «Электро-Л» №2, «Канопус-В» №1, «Метеор-М» №1, «Метеор-М» №2, «Ресурс-П» №1, «Ресурс-П» №2, «Ресурс-П» №3. В рамках рассмотренной задачи, рассмотрим каждый спутник как один пункт обработки информации, имеющий ряд параметров, которые существенно влияют на результаты выполнения заявки. К числу таких параметров относятся угол маски (видимость потребителем), перечень установленной аппаратуры, перечень наземных пунктов способных принимать информацию с борта ИСЗ, дата начала моделирования.

Аппаратура наблюдения является основной полезной нагрузкой на борту спутника, так как именно она обеспечивает получение необходимой космической информации для удовлетворения требований потребителей. Модель аппаратуры наблюдения должна включать в себя все те параметры, от которых зависит выполнение указанных требований. К их числу следует отнести тип аппаратуры и ее рабочий спектральный диапазон длин волн, разрешение получаемой информации, геометрические характеристики (фокусное расстояние, углы захвата, обзора, визирования) [4].

Для модели аппаратуры наблюдения, принимаются следующие допущения:

- возможно одновременное включение аппаратуры разного типа,
- во время включения возможно проведение наблюдений в интересах других заявок, если это не связано с переориентацией линии визирования.

В состав бортовых систем, кроме аппаратуры наблюдения, входит бортовое запоминающее устройство, ёмкость которого используется в качестве ограничения при моделировании процесса генерации начального трафика информации (на космическом сегменте).

Модель эволюции спутниковой группировки представляется в виде текстовых файлов, каждая строка которых содержит [5]:

- время,
- X, Y, Z, V_x, V_y, V_z – соответственно координаты и составляющие скорости в экваториальной инерциальной системе координат,
- долгота, широта, радиус – в географической системе координат.

В промежутках траектория движения рассчитывается по формулам невозмущенного движения.

Наземный сегмент состоит из пунктов приема и обработки информации. В их состав входит приемно-передающая аппаратура и вычислительные средства. Для каждого типа приемно-передающей аппаратуры устанавливается:

- описание типа аппаратуры
- признак доступа КА в виде угла маски,
- перечень КА, обслуживание которых возможно данным типом аппаратуры на данном наземном пункте.

КА считается доступным, если его угол места больше минимального угла возвышения в пункте приема информации. Имеется и более сложная модель проверки условия доступности КА с помощью задания признаков доступности на растровом изображении для подспутниковой точки каждого КА.

Таким образом, зная область наблюдения, эволюцию КА, привязку аппаратуры наблюдения к конкретным КА и возможности по приему информации со стороны наземных пунктов можно получить следующую информацию:

- возможные интервалы проведения съемок и их продолжительность для каждой области наблюдения,
- возможные интервалы проведения сеансов связи с наземными пунктами и их продолжительность.

Это необходимо для расчета времени прохождения заявки на космическом сегменте.

Второй составляющей модели процесса обработки информации является модель обработки космической информации непосредственно на наземном сегменте. Эта модель представляет собой функцию, которая рассчитывает объем выходной информации, в зависимости от объема входной информации (см. рисунок 3).

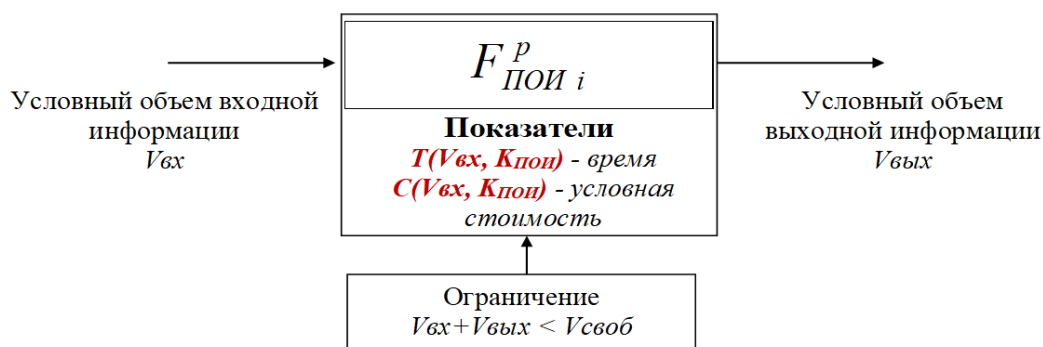


Рис. 3– Модель процесса обработки космических информацией (наземный сегмент)

Модель распределения заявки

Модель распределения заявки по составным наземного сегмента обработки данных ДЗЗ играет наибольшую роль в моделировании процесса функционирования, так как именно она в конечном итоге используется для решения задачи нахождения оптимального пути прохождения заявок по пунктам обработки до конечного пункта, являющего потребителем.

Предположим, что имеется сформированная заявка, для которой определены все процессы ее обработки. Тогда обобщая поставленную задачу с учетом предложенных моделей все возможные варианты выполнения заявки образуют направленный граф (см. рисунок 4)

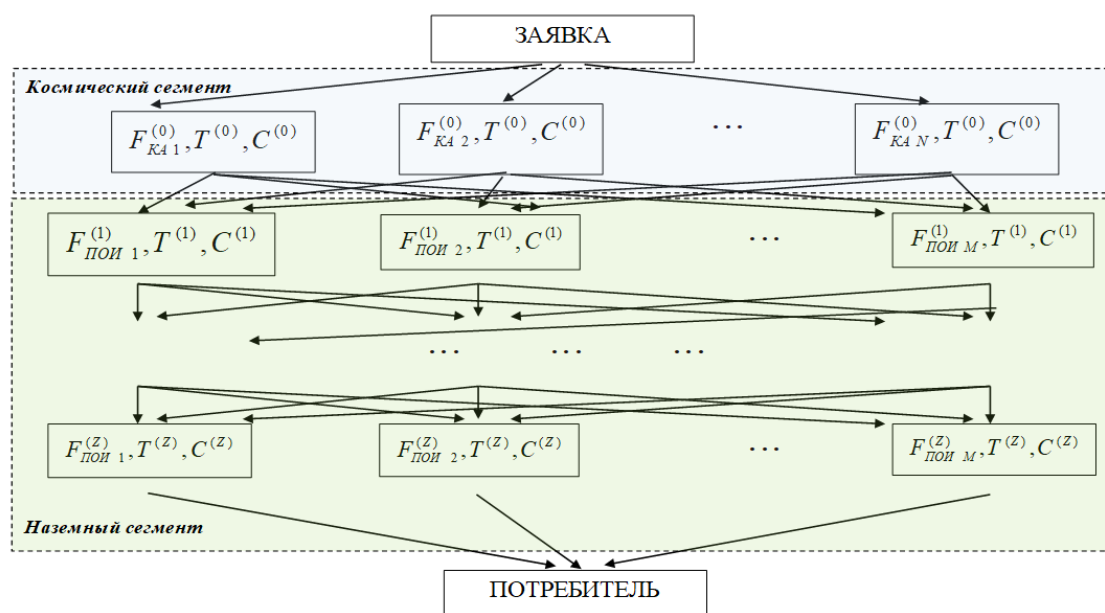


Рис. 4– Модель распределения заявки

Вершиной графа является заявка. На следующем уровне расположен космический сегмент, который в рамках представленной модели является генератором начального трафика. Напомним, что условный объем информации (трафик) был принят нами в качестве одной из независимых переменных, на основе которых производятся определение изменения трафика при выполнении процесса, а также вычисляются временной и стоимостной показатели. Другой независимый параметр – системное время служит для формирования ограничения - $V_{свод}$ в случае обслуживания нескольких заявок.

На третьем уровне и ниже располагаются процессы обработки (по вертикали) распределенные по элементам инфраструктуры (по горизонтали). Для упрощения реализации модели количество элементов инфраструктуры участвующих в процессе обработки можно считать всегда постоянным и равным общему числу элементов инфраструктуры. Выводить элемент из процесса обработки предлагается формированием в нем бесконечно больших значений показателей времени обработки T и условной стоимости C .

На нижнем уровне находится потребитель. Предполагается, что он для конкретной заявки единственный и все заключительные процессы обработки завязаны на нем.

Особенностью графа является отсутствие горизонтальных связей, что существенно упрощает процесс его оптимизации. Недостатком такого построения графа является то, что отсутствие горизонтальных связей закрывает возможность автоматического переноса заявки на другой узел в случае ее вытеснения более приоритетной, экстренной, заявкой.

Прохождение трафика по графу приведет к вычислению показателей:

$$\text{Суммарное время } T_{\Sigma} = T_{КА} + \sum_{P=0}^Z \{T^P + T_{ЛС}^P\}, \quad T_{ЛС}^P = \frac{V_{ВХ}^P}{V^P}$$

$$\text{Условная стоимость } C_{\Sigma} = C_{КА} + \sum_{P=0}^Z \{C^P + C_{ЛС}^P\}, \quad C_{ЛС}^P - \text{стоимость передачи информации.}$$

Таким образом, возникает задача распределения процессов обработки [6] таким образом, чтобы был минимизирован один из представленных выше системных показателей или их свертка. Эта задача известна как задача нахождения кратчайшего пути во взвешенном графе.

Заключение

В данной статье обсуждается проблема создания моделей, необходимых для решения задачи оптимального распределения целевой информации КА по составным частям наземной инфраструктуры обработки космической информации. К числу основных моделей следует отнести модель заявки потребителя, которая представляет интересы потребителя к космической информации; модель спутниковой группировки, являющейся неотъемлемой составной частью системы ДЗЗ; модель аппаратуры наблюдения, без которой не могут быть решены задачи генерации начального трафика; модель основных бортовых систем, обеспечивающих требуемое функционирование спутника и аппаратуры наблюдения; модель орбитальной группировки, характеризующей эволюцию спутниковой группировки в целом; модель наземных пунктов приёма и передачи космической информации, определяющих возможность принятия сигнала от КА и влияющей на характеристики НКПОР в процессе функционирования.

Рассмотренная в работе модель позволяет достаточно просто реализовать ее на компьютере и оценить эффективность системы в целом при исследовании ее работы. При этом, возникает возможность оптимизации процесса распределения заявок по составным частям наземной инфраструктуры. Характерная особенность рассматриваемых моделей состоит в том, что все модели являются упрощенными. Они содержат лишь те параметры, которые наиболее существенно влияют на эффективность системы и тем самым упрощают сам процесс моделирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания
(проект № 9.7505.2017/БЧ)*

Список литературы

1. Гришанцева Л.А., Бубненко Д.И., Егорова Н.А., Емельянов А.А., Селин В.А. О технологии комплексного применения группировки малых космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса . 2016. Т. 13. № 6. С. 43-50.
2. Ворожцов А.С., Тутов А.В., Тутова Н.В. Оптимизация размещения облачных серверов в центрах обработки данных // Т-Comm: Телекоммуникации и: транспорт, №6.-2015.-С.4-8.
3. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ, 2017, №96, URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85921>
4. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Под ред. В.В. Еремеева. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 460 с.
5. Малышев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Фёдоров А.В. Методы поддержания параметров структуры высокоорбитальной группировки космических аппаратов для компенсации ухудшения её функциональных возможностей // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш 2017. № 2 (95). С. 37-45.
6. Вдовин П.М., Зотов И.А., Костенко В.А., Плакунов А.В., Смелянский Р.Л. Сравнение различных подходов к распределению ресурсов в центрах обработки данных // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 5
7. Гинзбург И.Б. Отказоустойчивые веб-интерфейсы для геоинформационных систем с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 4. С. 72-75.

05.13.18

¹А.Н. Заикин, ²Е.Г. Рыжикова

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»

¹Институт лесного комплекса, транспорта и экологии,

кафедра «Транспортно-технологические машины и сервис»

²Инженерно-экономический институт, кафедра «Информационные технологии»

Брянск, e-izumova@mail.ru

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ****DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-80-82**

Представлены результаты вычислительного эксперимента по исследованию производственных процессов, выполняемых комплектами машин. Предложен подход к статистическому анализу регрессионных моделей с использованием параметрических и непараметрических критериев.

Ключевые слова: *вычислительные эксперименты, непараметрические критерии, статистический анализ.*

Основы планирования экспериментов в рамках натурных исследований стали разрабатываться в России с середины XX века. В настоящее время, ввиду бурного развития компьютерной техники, программного обеспечения становятся весьма актуальными вычислительные эксперименты, для которых требуется адаптировать методики проведения натурных испытаний, подходы к обработке результатов.

Проводился компьютерный эксперимент, функция отклика которого выражала энергозатраты производственного процесса, выполняемого комплектом машин. Число смен работы машин на каждой технологической операции являлось управляющими факторами. Подходы к проведению вычислительных экспериментов [1,2,3], которые были взяты за основу при проведении исследований, потребовали модификаций. Ввиду того, что опыты проводятся не над реальными процессами, а над их математическими моделями возникли вопросы по моделированию параллельных опытов в точках матрицы планирования, а также выявлены опыты, в которых значение отклика не может быть определено из-за нарушения ограничений, присутствующих в математических моделях.

Предложено параллельные опыты заменить на условно-параллельные. Это опыты, проводимые в каждой точке матрицы плана вычислительного эксперимента, входные параметры для которых подбирает исследователь, обеспечивая их искусственное (условное) изменение, приближенное к тому, которое могло происходить в натурных испытаниях. Ряд подходов к их проведению предложен в [4].

Отдельные условно-параллельные опыты, в которых не может быть определено значение функции отклика с помощью математических моделей исследуемого процесса, назовем условно-недопустимыми. Под недопустимой точкой плана будем понимать такую точку, в которой все условно-параллельные опыты оказались недопустимыми. Условно-недопустимые опыты и точки могут быть обнаружены только в ходе компьютерного эксперимента. В этом случае наблюдается неравномерным дублированием опытов в точках матрицы плана, что затрудняет статистический анализ регрессионных моделей.

При постановке экспериментов исходная матрица планирования имеет размерность 81×20 . Условно-параллельные опыты были организованы с использованием значений норм выработки машин, изменяющихся в зависимости от природно-климатических условий. Их можно получить из специальных справочников, составляемых на предприятиях. Количество условно-параллельных опытов в точках матрицы плана от 1 до 46 в виду наличия условно-недопустимых опытов.

В результате постановки многофакторного эксперимента с неравномерным дублированием параллельных опытов в точках плана получена регрессионная модель (1).

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -1413x_1 + 218.235x_2 + 1500x_3 - 567.475x_4 - 214.186x_2^2 - 562.565x_3^2 - 191.789x_4^2 + 348.082x_1x_2 + 952.214x_1x_3 - 934.283x_1x_4 + 417.658x_3x_4 + 2195, \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 - число смен работы машин на соответствующей технологической операции.

Используемые критерии и результаты статистического анализа регрессионной модели (1) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистический анализ регрессионной модели

Критерии	Показатели	Результаты расчёта для регрессионной модели	Критические значения при $\alpha=0.05$
Шапиро-Уилка	W	36.4	0.945
Бартлета	χ^2	44.7	68.669
Фишера	F	54.3	1.3
Сиджела-Тьюки	n_m - выборка меньшего объема	76	1.96
	n_b - выборка большего объема	1254	
	R - ранговая сумма выборки меньшего объёма	48322	
	z	0.69	

Значимость коэффициентов регрессионной модели может быть определена по критерию Стьюдента т.к. согласно [3] он малочувствителен к отклонениям от нормального закона распределения случайных величин по сравнению с другими критериями. Для оценки дисперсии воспроизводимости в точках плана с одним опытом было распространено её значение, рассчитанное в центре плана. Адекватность модели проверялась в точках матрицы плана по критериям Фишера и Сиджела-Тьюки т.к. присутствуют точки, в которых отклик подчиняется закону нормального распределения, а также точки, в которых он нарушается.

Рекомендации по проведению статистического анализа регрессионной модели, полученной по результатам вычислительного эксперимента можно представить в виде схемы (рисунок 1).

Элементы научной новизны проведенного исследования состоят в следующем:

1. В матрице плана эксперимента обнаружены точки, в которых распределение значений выходного параметра подчиняется закону нормального распределения, а также точки, для которых гипотеза о нормальном законе распределения отвергается.
2. Неравномерное дублирование опытов в точках матрицы плана.
3. Наличие в матрице планирования экспериментов большого числа точек с одним опытом.

Названные пункты были учтены при разработке представленной схемы статистического анализа. Проявляются в использовании непараметрических критериев совместно с параметрическими.

Модель, полученная по результатам эксперимента адекватна по критерию Сиджела-Тьюки. Выполнена её дальнейшая оптимизация, по результатам которой определены оптимальные параметры исследуемого процесса. Организация производственных процессов с их учетом позволяет сократить себестоимость работ до 13.7 %, удельный расход энергии до 20.8%, удельные трудозатраты до 36.9%, затрат на топливо до 30.5% по сравнению с организацией процесса без учета оптимальных значений его параметров.

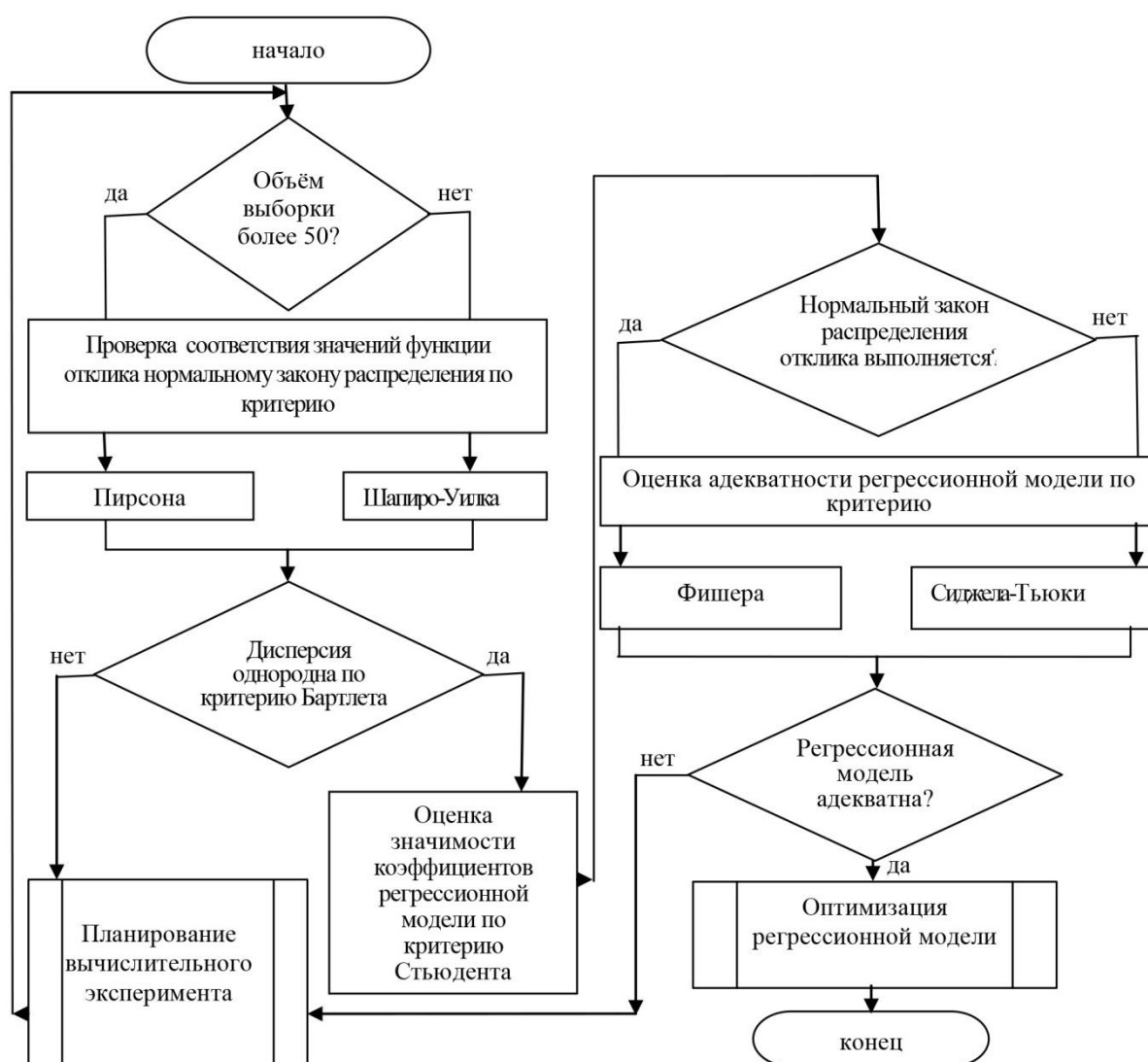


Рис. 1 – Схема исследования регрессионной модели

Проведенное исследование и полученный экономический эффект подтверждают целесообразность использования и модификаций методик проведения вычислительных экспериментов, справедливость предложенных подходов к организации условно-параллельных опытов в вычислительных экспериментах, к статистическому анализу регрессионных моделей при наличии недопустимых точек в матрице плана, точек с одним опытом, неравномерном дублировании параллельных опытов, отклонении распределений отклика от нормального закона.

Список литературы

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – М.: Наука. – 1976. – 286 с.
2. Нечаев К.Н. Теория планирования многофакторных экспериментов – резерв повышения эффективности технологических процессов // Российский научно-технический журнал "Инструмент и технологии". – Санкт-Петербург. – 2008. – №25. – вып.1. – С. 140-145.
3. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение. – 1985. – 232 с.
4. Евельсон Л.И. Исследование и оптимизация производственных процессов с помощью вычислительного эксперимента / Л.И. Евельсон, А.Н. Заикин, Е.Г. Рыжикова // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сборник начн. трудов по материалам междунар. заочн. научно-практич. конф. – Воронеж: ВГЛТА, 2015. - №2 ч.1. – С. 220-224.

05.13.19

В.М. Коржук, Патрик Бонковски, И.М. Шилов

Университет ИТМО

vika@cit.ifmo.ru, ba_ski@hotmail.com, ilya.shilov@yandex.ru

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ АТАК НА БЕСПРОВОДНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СЕТИ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ СЕТИ****DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-83-85**

В статье описан разрабатываемый метод идентификации атак на сенсорные сети. Выбраны признаки, характеризующие различные атаки на информационную безопасность беспроводных сенсорных сетей; разработано признаковое пространство. Проведен анализ и выбран наиболее подходящий для поставленных условий и целей метод машинного обучения. Результаты могут быть использованы в системах мониторинга информационной безопасности и системах обнаружения вторжений.

Ключевые слова: *информационная безопасность, беспроводные сети, сенсорные сети, идентификация атак, аномальное поведение.*

Беспроводные сенсорные сети получают все более широкое распространение. На основе данной технологии разработаны такие системы, как «Умный дом», «Умный город», «Индустрия 4.0»; они применяются в различных сферах жизнедеятельности, включая медицину, агропромышленность и военную сферу [1].

Вследствие того, что беспроводные сенсорные сети состоят из маломощных, относительно простых устройств, существуют некоторые особенности обеспечения информационной безопасности систем, основанных на данной технологии. Например, использование криптографических средств защиты не всегда возможно, а использование встроенных возможностей маршрутизаторов зависит напрямую от администратора сетей.

В соответствие с этим, целью авторов данной статьи является разработка метода идентификации атак на беспроводные сенсорные сети для последующего внедрения метода в системы мониторинга информационной безопасности (СМИБ) и системы обнаружения вторжений (СОВ). В основе процесса идентификации атак лежит сбор и анализ статистической информации о работе сети: отклонения от установленной нормы являются аномалиями и характеризуют состояние сети [2, 3].

Для сбора статистических данных была разработана модель проведения атак на беспроводные сенсорные сети на основе среды OMNeT++. Данная модель разрабатывалась на основе реальной беспроводной сенсорной сети, состоящей из 132 устройств различного типа (сеть автокомплекса «Реактор»).

Были смоделированы две топологии сети – ячеистая сеть и кластерное дерево. Для этих топологий реализованы разные объекты взаимодействия и способы адресации. Кроме того, для каждой топологии были реализованы атакующие узлы. В рамках модели возможно исследование следующих типов атак (и их вариаций): повторная передача, спуфинг, атака Сибиллы, червоточина, воронка, выборочная пересылка, отказ во сне, затопление [4].

В процессе работы было формализовано признаковое пространство, состоящее более чем из 50 признаков (количественных, агрегированных признаков и признаков-соотношений). С помощью оценки информативности по методу Шеннона и коэффициента корреляции Пирсона, признаковое пространство было сокращено до 11 признаков [5,6], таких как:

1. num_packets_avg – общее количество пакетов, переданных в сети по спецификации ZigBee, усредненное по числу PAN в сети;
2. frac_packets_in_out_avg – соотношение для каждого узла количества полученных и переданных в сеть пакетов (среднее значение);
3. num_packets_equal_src_pan_max – максимальное количество полученных пакетов, в

которых в качестве PAN отправителя указан один и тот же PAN и др.

Для удобства применения метода была составлена матрица, содержащая в себе информацию о процентном соотношении всех признаков для нормального поведения сети и под атакой. Часть матрицы приведена на рисунке 1.

	10,00%	dos	flood	normal	rep_transm	rep_transm_dest	rep_transm_src	selective_forward
frac_packets_in_out_pan_avg		40,53%	41,02%	100,00%	162,86%	100,21%	101,35%	33,59%
frac_packets_in_out_pan_max		100,00%	200,60%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
frac_packets_in_out_pan_min		100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,60%	100,60%	100,00%
num_packets_equal_src_avg		106,34%	132,22%	100,00%	108,48%	100,13%	100,12%	92,04%
num_packets_equal_src_max		463,60%	2178,99%	100,00%	118,10%	100,61%	103,65%	96,68%
num_packets_equal_src_min		99,20%	99,21%	100,00%	103,96%	100,17%	99,83%	79,59%
num_packets_equal_src_pan_avg		99,99%	124,65%	100,00%	108,34%	100,31%	100,30%	91,66%
num_packets_equal_src_pan_max		100,01%	465,31%	100,00%	127,31%	100,62%	103,61%	99,58%
num_packets_equal_src_pan_min		99,96%	100,06%	100,00%	100,42%	100,15%	100,02%	72,12%
num_packets_equal_dest_avg		100,00%	125,13%	100,00%	108,48%	100,13%	100,12%	92,04%
num_packets_equal_dest_max		525,23%	2207,44%	100,00%	116,78%	104,53%	100,30%	94,70%
num_packets_equal_dest_min		92,35%	91,81%	100,00%	106,36%	100,44%	100,56%	81,47%
num_packets_equal_dest_pan_avg		99,99%	124,65%	100,00%	108,34%	100,31%	100,30%	91,66%
num_packets_equal_dest_pan_max		177,78%	518,42%	100,00%	119,31%	101,23%	100,68%	95,50%
num_packets_equal_dest_pan_min		92,87%	92,81%	100,00%	104,95%	100,00%	100,20%	78,58%
num_frames_out_avg		103,72%	119,29%	100,00%	104,53%	100,01%	100,12%	95,30%
num frames out max		93,60%	170,57%	100,00%	108,14%	100,00%	100,39%	94,84%

Рис.1 - Матрица процентного соотношения признаков

В целях выбора классификатора, наиболее удовлетворяющего поставленным условиям, было принято решение рассмотреть несколько алгоритмов классификации: решающее дерево, градиентный бустинг и его частный случай AdaBoost, стохастический лес (версия ExtraTrees), логистическая регрессия, метод стохастического градиента, метод опорных векторов (линейный и с квадратичным ядром), наивный Байесовский классификатор, линейный и квадратичный дискриминантный анализ, алгоритм ближайшего соседа и k-ближайших соседей, метод парзеновского окна.

В результате анализа статистических данных с помощью машинного обучения, был создан минимальный набор признаков, при котором классификация происходит корректно. Этот набор содержит лишь 5 признаков.

Оценка классификаторов производилась по нескольким метрикам, однако основной являлась F-мера, учитывающая ошибки 1-го и 2-го рода:

$$F = 2 \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}$$

Наиболее высокие результаты показали на различных типах выборок (общая – 51 признак, информативная – 34 признак, сокращенная – 11 признаков, минимальная – 5 признаков) показали алгоритмы дерево решений, ExtraTrees, градиентный бустинг и стохастический лес. Часть сравнительной таблицы приведена на рисунке 2.

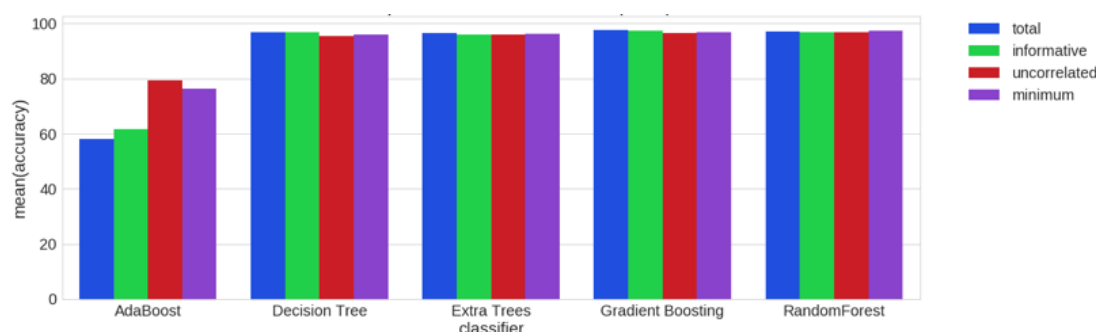


Рис. 2 – Точность выбранных алгоритмов

В результате сравнения можно сделать следующие выводы:

Основных выводов два:

1. Точность классификации значительно не изменяется при сокращении признакового пространства, что подтверждает исключительную важность признаков, попавших в сокращенный набор и набор минимум;

2. Все алгоритмы многоклассовой классификации, кроме AdaBoost, показывают примерно одинаковую точность – около 97%.

На основании приведенных данных предлагается разработать метод идентификации атак на сенсорные сети, а в дальнейшем – методику идентификации атак. Метод содержит в себе следующие положения:

1. Сбор статистических характеристик сети;
2. Построение модели атак на конкретную беспроводную сенсорную сеть – простой процесс, который сводится к построению конфигурационных файлов;
3. Сбор данных – процесс, аналогичный тому, что был произведен вручную в рамках работы, причем возможен одновременный сбор данных для разных периодов генерации пакетов;
4. Обучение выбранного алгоритма машинного обучения – выбор практически произволен и зависит от предпочтений разработчика или от требований конкретной системы.
5. Применение полученного классификатора.

Возможно несколько вариантов сбора реальных статистических данных, среди которых:

1. Использование одного модуля, прослушивающего сеть и формирующего статистику отправлений.
2. Использование дополнительной сети, прослушивающей основную и накапливающей статистику;
3. Построение протокола прикладного уровня, предназначенного для сбора статистики – наиболее перспективный подход, в котором сбором статистики занимаются сами маршрутизаторы (они передают накопленную информацию координатору через равные промежутки времени). Главной проблемой этого подхода является выявление ложной статистики, передаваемой атакующим узлом.

Также возможно применение нескольких классификаторов с разными периодами сбора статистики. Чем больше период, тем больше точность, но тем дольше реакция. Поэтому рекомендуется помимо классификатора с большим периодом сбора статистики применять один или несколько классификаторов с меньшим периодом. Эти классификаторы обладают меньшей точностью и призваны как можно быстрее предупреждать администратора сети о потенциальной возможности аномальной активности в сети.

Список литературы

1. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. [Текст] = Computer Networks: учебное пособие / Таненбаум Э., Уэзеролл Д.; пер. А. Гребенькова. - 5-е издание. – СПб.: Питер, 2013. – 960 с.: ил. – (Серия «Классика Computer Science»). – ISBN 978-5-4461-0068-2.
2. Бажаев Н., Давыдов А.Е., Кривцова И.Е., Лебедев И.С., Салахутдинова К.И. Подход к анализу состояния информационной безопасности беспроводной сети. Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 6(66). С. 121-128. [Тип: Статья, Год: 2016]
3. Бажаев Н., Лебедев И.С., Кривцова И.Е. Анализ статистических данных мониторинга сетевой инфраструктуры для выявления аномального поведения локального сегмента системы. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1(107). С. 92-99.
4. Korzhuk, V. The Model of the Attack Implementation on Wireless Sensor Networks / V. Korzhuk, I. Krivtsova, I. Shilov // Proceedings of the 20th Conference of Open Innovations Association FRUCT. - 2017. – pp. 187-194.
5. Zikratov, I. Formalization of the Feature Space for Detection of Attacks on Wireless Sensor Networks / I. Zikratov, V. Korzhuk, I. Shilov, A. Gvozdev // Proceedings of the 20th Conference of Open Innovations Association FRUCT. - 2017. - pp. 526-533
6. Korzhuk, V. Reduction of the Feature Space for the Detection of Attacks of Wireless Sensor Networks / V. Korzhuk, I. Shilov, J. Torshenko // Proceedings of the 20th Conference of Open Innovations Association FRUCT. - 2017. – pp. 195-201.

05.13.00

В.А. Соловьев д.т.н., Н.Е. Дерюжкова к.т.н., Чжо Аунг Хтет, В.В. Тетерин

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, электротехнический факультет,
кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»,
Комсомольск-на-Амуре, epau@knastu.ru

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХТОЧЕЧНОГО УЗЛА ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТИПА

DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-86-90

В статье рассматриваются построение имитационной модели трехточечной взаимосвязанной системы формования листового материала в среде MatLab. Процесс формования можно считать как процесс изгиба и силовое воздействия на листовой материал вынуждает рассматривать систему управления электроприводами как взаимосвязанную. Результаты переходного процесса трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования показаны.

Ключевые слова: *взаимосвязанная система, математической модели, объемное формование, изгиб.*

В конструкциях изделий машиностроительного производства широко применяются крупногабаритные металлические детали двойной кривизны из листового материала. Придание листовому материалу определенной кривизны позволяет сократить временные и ресурсные затраты на изготовления изделия. Одним из способов получения таких изделий является способ высокотемпературной многоточечной формовки [1-3]. При изготовлении на заготовку воздействует массив независимо движущихся стержней. Процесс формообразования зависит от множества разнородных факторов: свойств материала, температуры, скорости изменения прикладываемого усилия и др. Проведение исследований на реальном объекте для получения оптимизационных режимов формования реализовать трудно, из-за единичности установки формования, а изготовление опытной установки дорогостоящее мероприятие. Поэтому целесообразно процесс исследования перевести в область моделирования.

При разработке имитационной модели взаимосвязанной системы формования листового материала будем опираться на математическую модель материала полученную в [4]. Будем считать, что процесс формования обеспечивает пластическое деформирование материала при линейном законе упрочнения. За базовый узел формования примем трех точечную модель гибки листового материала с условием, что и формирующее поперечное усилие и противодействующие опорные усилия являются управляемыми и создаются с помощью оппозитно перемещаемых стержней. Перемещение стержней осуществляется автономными частотно-регулируемыми электроприводами. На рис. 1 приведена схема имитационной модели трех точечного узла формования учитывающего взаимосвязь выходных координат электроприводов стержней через общий объект регулирования.

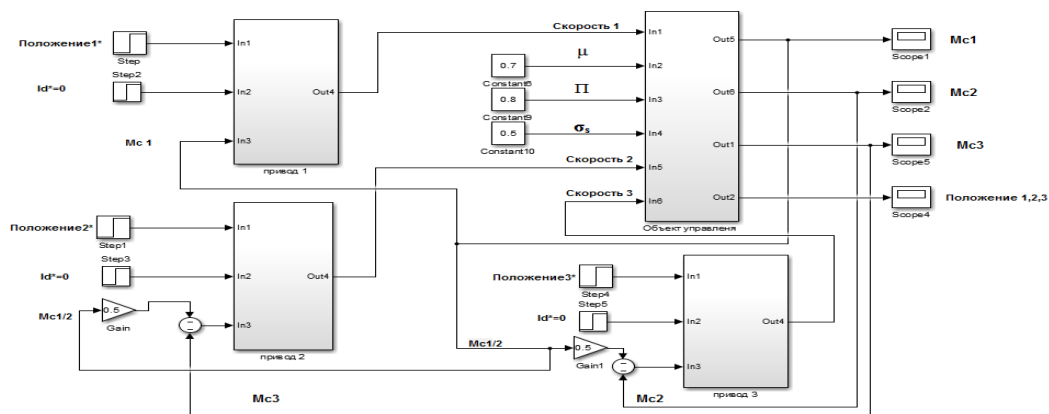


Рис. 1– Имитационная модель объекта регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования в среде Mat Lab

Обозначениям, приведенным на рис.1 соответствуют: M_{c1} – момент нагрузки первого привода ; M_{c2} – момент нагрузки второго привода ; M_{c3} – момент нагрузки третьего привода; Π – модуль упрочнения материала; μ – коэффициент трения между стержнем и заготовкой; σ_s – модуль пластичности материала.

Как известно, процесс деформации является нестационарным процессом, в силу того, что параметры процесса (значения сил, моментов, радиуса кривизны) изменяются во времени. Получить аналитическую зависимость между действующими усилиями и линейными перемещениями стержней затруднительно. В первом приближении будем считать, что радиус гибки превышает три толщины заготовки, а это позволяет считать процесс пластического изгиба исходя из схемы линейного напряженного состояния металла. В такой постановке можно зависимость между поперечным усилием и скоростью линейного перемещения стержня выразить в виде передаточной функции инерционного звена первого порядка

$$W_r(p) = \frac{\Delta P(p)}{\Delta V(p)} = \frac{K_r}{T_r p + 1},$$

где $K_r = T / \Delta V_{ст}$ – коэффициент изгиба, T – натяжение металла обусловленное разностью скоростей перемещения стержней, разность скоростей перемещения формирующих стержней; $T_r = \frac{l K_r}{\sigma_s Q}$, l – расстояние между формирующими стержнями, σ_s – модуль пластичности материала, Q – сечение изгибаемого материала. Опираясь на закон Гука можно записать

$$T_r = \Delta l \frac{\sigma_s Q}{T} \frac{K_r}{\sigma_s Q} = \Delta l \frac{K_r}{T} = \frac{\Delta l}{\Delta V_{ст}}$$

При разработке математической модели узла процесса формирования листового материала использовались материалы научно-исследовательской работы «Разработка технологии и технологического оснащения изготовления монолитных крупногабаритных оребренных панелей» (договор № 86/10-16 от «16» марта 2016 г), в которых была обоснована целесообразность использования в качестве электропривода линейного перемещения стержней – электропривода переменного тока на базе синхронного серводвигателя (1FK7060-2AC71-1RH2). Силовая часть электропривода представлена в виде понижающего редуктора и преобразователя вращательного движения двигателя в поступательное с помощью типовой шарико-винтовой пары (актуатора) типа EMC-125-HD. Управление синхронным серводвигателем выполнено на основе векторного управления в неподвижной системе координат d-q, в качестве внешней обратной связи используется обратная связь по положению. В этом случае, если принять, что динамические свойства автономного инвертора описываются инерционным звеном первого порядка с коэффициентом передачи $K_{и}$ и постоянной времени $T_{и}$, уравнения проекций вектора напряжения статора на оси d-q будут иметь вид [5]:

$$u_{1d} = \frac{k_u u_{1d}^* + p_n \omega T_u u_{1q}}{T_u p + 1},$$

$$u_{1q} = \frac{k_u u_{1q}^* + p_n \omega T_u u_{1d}}{T_u p + 1},$$

где u_{1d}^* , u_{1q}^* – напряжения управления на входе автономного инвертора в координатах d-q.

В такой постановке структурная схема одного привода линейного перемещения будет представлять собой вид, показанный на рис.2.

При синтезе структурной схемы учитывалось, что электромагнитный момент синхронного серводвигателя с постоянными магнитами имеет вид:

$$M_d = \left(\frac{3}{2}\right) p_n [\psi_f i_{1q} + (L_{1d} - L_{1q}) i_{1d} i_{1q}].$$

Обозначениям, в уравнении соответствуют: p_n – число полюсов двигателя; ψ_f – потокосцепление ротора; i_{1d} , i_{1q} – токи обмотки статора по неподвижным координатам d-q; L_{1d} , L_{1q} – индуктивности обмотки статора по неподвижным координатам d-q.

Такое представление электромагнитного момента приводит к появлению в структуре дополнительных перекрестных связей по проекциям вектора тока i_{1d} и i_{1q} , а также по проекциям вектора напряжения u_{1d} и u_{1q} . Данные перекрестные связи являются возмущающими для токовых контуров. При высоком быстродействии токовых контуров влиянием этих возмущений можно пренебречь.

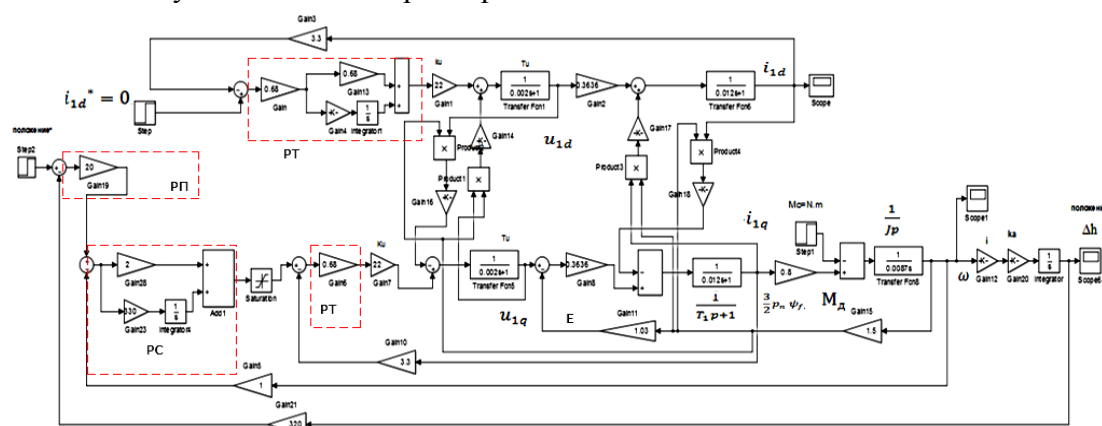


Рис. 2– Структурная схема привода в среде Mat Lab

Для обеспечения режима эффективного управления синхронным серводвигателем с постоянными магнитами переменного тока, целесообразно чтобы составляющая тока i_{1d} была равна нулю, т.е. задание i_{1d}^* должно быть равным нулю. В этом случае, при постоянном потокосцеплении ротора ψ_f , составляющая тока i_{1q} по оси q эффективно будет определять электромагнитный момент синхронного серводвигателя с постоянными магнитами. И математическое описание электрического момента двигателя имеет вид:

$$M_d = \left(\frac{3}{2}\right) p_n (\psi_f i_{1q}).$$

Такое представление электромагнитного момента требует знание величины потокосцепления ротора ψ_f . Однако в справочных данных синхронных машин данная величина не всегда присутствует. Для устранения этого недостатка можно воспользоваться методикой приближенной оценки величины потокосцепления [6]. Опыт показывает, что расчетное значение ψ_f отличается от реальных значений (для синхронных машин у которых значение ψ_f в каталожных данных имеется) не более чем на 8-10%.

На основании имитационной модели (рис.3.) и синтезированной схемы трех контурного синхронного электропривода была выполнена модель трехточечной взаимосвязанной системы силового формирования листового материала. Результаты моделирования для некоторых значений скоростей перемещения стержней и создаваемых усилий приведены на рис.4,5

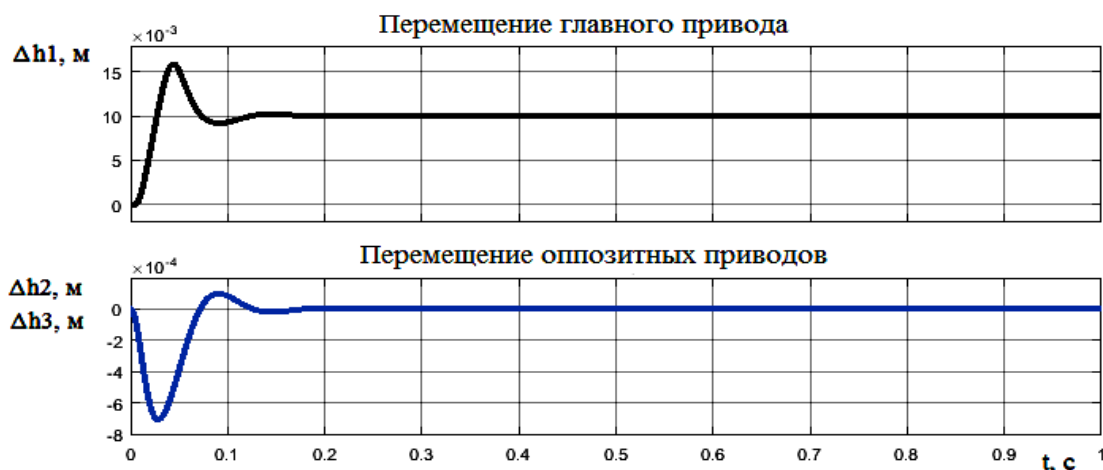


Рис. 3– Переходные процессы при регулировании приводов в системе регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования в среде Mat Lab

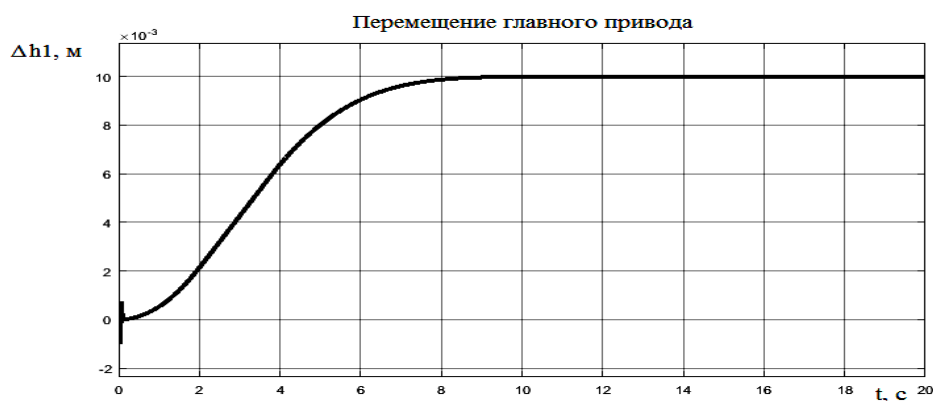


Рис. 4– Переходные процессы при регулировании 1-ого привода в системе регулирования трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования в среде Mat Lab

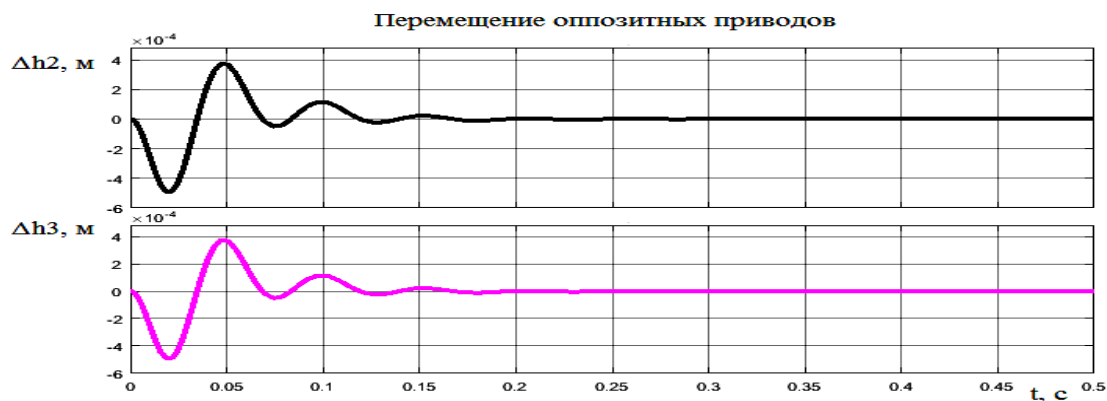


Рис.5– Переходные процессы при регулировании 2-ого и 3-ого приводов

Из кривых, представленных на графиках, отчетливо прослеживается взаимовлияние электроприводов друг на друга. Наиболее ярко взаимосвязь между приводами проявляется при скачкообразном воздействии на основной привод перемещения. При этом в начальный момент наблюдается «проседание» на оппозитных электроприводах (рис. 3). Величина просадки на оппозитных приводах соизмерима с основным перемещением привода, осуществляющего изгиб. В силу того, что технологический процесс изгиба требует плавного изменения силового воздействия для исключения возможных нарушений целостности структуры материала, на рисунке 4 приведена реакция той же самой системы при плавном силовом воздействии основного привода. В данном случае проявляется взаимосвязь в виде

отрицательной реакции на оппозитные привода. Правда, величина просадки в данном случае существенно меньше. Тем не менее, взаимосвязь между основным и оппозитными приводами имеет существенное значение, что отрицательно скажется при формировании изделия. Поэтому прямое управление системой приводов формирующих стержней без учета компенсаций взаимовлияний не допустимо. Это наталкивает на решение вопросов компенсации этих возмущений.

Список литературы

1. Братухин А.Г., Сироткин О.С., Боголюбов В.С., Карпов А. В. Универсальная автоматизированная установка для формообразования крупногабаритных листовых деталей и способ настройки ее поверхности // Патент России № 2133163. 1999.
2. Гусев Г.А., Любашевская И.В., Рублевский Л.Л. Устройство для формообразования // Патент России № 2216421. 2003.
3. Клопотов И.Д., Любашевская И.В., Раевская Г.А., Рублевский Л.Л., Соснин О.В. Способ формообразования деталей из плоской или криволинейной заготовки // Патент РФ № 2251464. 2005.
4. Дерюжкова, Н.Е. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объемного формования / Н.Е. Дерюжкова, В. А. Соловьев, Чжо Аунг Хтет // Ученые записки КНАГТУ. – Комсомольск-на-Амуре, 2017. № 2.
5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М. : Академия, 2006. - с.
6. Чжо Аунг Хтет. Оценка параметров синхронного двигателя для систем стабилизации момента / Чжо Аунг Хтет, В. А. Соловьев // Электротехнические комплексы и системы: материалы межд. Н.-прак. Конференции. В 2 т. / Уфимск. Гос. авиац. Техн. Ун-т.-Уфа: РИК УГАТУ, 2017. – 106 с.

05.13.18

¹Т.Е. Фазлутдинова, ²И.А. Акимов, ³А.И. АкимовОренбургский государственный аграрный университет,
Институт управления рисками и комплексной безопасности,¹кафедра автоматизированных систем обработки информации и управления,²кафедра техносферной и информационной безопасности,

Оренбург, fataeva84@bk.ru

³Филиал российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина,
отделение экономики, гуманитарных и естественно-научных дисциплин, Оренбург**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И
ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ
В ПРОИЗВОДСТВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ
МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ****DOI: 10.24153/2079-5920-2018-8-2-91-93***В работе приводится разработка математических моделей термоупругих напряжений и деформаций, методы их расчета в производстве многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации**Ключевые слова: многослойные конструкции, полимеризация, термоупругие напряжения и деформации, математические модели, сферическая форма.*

Как известно, задачи термонапряжения, термоупругости и деформаций для многослойных конструкций относятся к задачам с граничными условиями 4-го рода. В связи с развитием высокотемпературной теплофизики они приобретают первостепенное значение при проведении тепловых и прочностных расчетов конструкций авиационное и космической техники, расчетов многослойных композиционных материалов, широко применяемых во многих отраслях промышленности. Для получения многослойных материалов с заданными свойствами наилучшим образом подходят аналитические решения, т.к. они в явном виде содержат основные физические свойства среды.

Как известно, в случае, когда упругие характеристики материала в пределах каждого слоя являются постоянными, то возможно получить точные аналитические решения задач термоупругости для многослойных конструкций сферической формы.

Такие изделия в форме ограждающих конструкций используются в авиационной промышленности, космической технике и в ряде других отраслях промышленности. Однако, в процессе производства, в результате неравномерного распределения температуры по всей области конструкции, формируются термоупругие напряжения и деформации, которые следует выявить и устранить в процессе производства. Поэтому требуются исследования этих процессов и составление математических моделей и расчетных формул, максимально исключающие остаточные термонапряжения и деформации в изделиях.

Мы рассмотрим симметричную задачу термоупругости для многослойных шаров, производимых методом полимеризации.

Соотношения между упругими термонапряжениями и деформациями имеют вид [1]

$$\xi_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - 2\mu\sigma_\varphi) + d_U U; \quad (1)$$

$$\xi_\varphi = \frac{1}{E}[(1 - \mu)\sigma_\varphi - \mu\sigma_r] + d_U U; \quad (2)$$

Уравнение равновесия для шара

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{r}(\sigma_r - \sigma_\varphi) = 0. \quad (3)$$

Уравнение совместности деформаций

$$\frac{d\xi_\varphi}{dr} + \frac{1}{r}(\xi_\varphi - \xi_r) = 0. \quad (4)$$

Геометрические уравнения

$$\xi_r = \frac{dm_r}{dr}, \quad \xi_\varphi = \frac{m_r}{r}, \quad (5)$$

где r – координата; σ_r – нормальное напряжение в радиальном направлении; σ_φ – нормальное окружное напряжение; ξ_r – радиальная деформация; m_r – радиальное перемещение; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости (модуль Юнга); d_U – коэффициент термического расширения; U – температура; δ – время.

Для случаев $\mu = \text{const}$, $E = \text{const}$, $d_U = \text{const}$ можно составить разрешающее дифференциальное уравнение относительно радиального напряжения σ_r и радиального перемещения m_r .

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \frac{4}{r} \frac{d\sigma_r}{dr} = - \frac{2d_U E}{(1-\mu)r} \cdot \frac{dU}{dr}; \quad (6)$$

$$\frac{d^2m_r}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dm_r}{dr} - \frac{2}{r^2} m_r = \frac{1+\mu}{1-\mu} d_U \cdot \frac{dU}{dr}; \quad (7)$$

После определения σ_r , остальные компоненты термонапряженного состояния находятся из уравнений (1), (2), (3), (5).

Соотношения между напряжениями и перемещениями имеют вид

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[(1-\mu) \frac{dm_r}{dr} + 2\mu \frac{m_r}{r} - (1+\mu) d_U \cdot U \right]; \quad (8)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[\mu \frac{dm_r}{dr} + \mu \frac{m_r}{r} + (1+\mu) d_U \cdot U \right]. \quad (9)$$

Решив уравнение (7) при заданных граничных условиях, напряжения и деформации можно найти из выражений (5), (8), (9).

Исследование термонапряженного состояния изделий с центральной симметрией рассмотрим на примере определения тепловых напряжений, возникающих в процессе охлаждения изделий сферической формы в авиационной промышленности и космической техники. Составим для трех слоев расчетные модели термоупругости и деформаций в процессе охлаждения в среде с постоянной температурой

$U_{cp} < U_0$, где U_0 – температура полимеризации связующего, U_{cp} – температура окружающей среды (цеха). Это соответствует третьему этапу производства композитов сферической формы, так как полимеризация уже завершена, отключаются системы электропитания и требуется охладить изделие до температуры окружающей среды (цеха) при следующих условиях:

- 1) Слои неразрывно полимеризованы на поверхности контактов;
- 2) Внешняя поверхность шара свободна от нагрузки;
- 3) Температурное поле известно и является функцией радиального расстояния и времени;
- 4) При $U_i(R, F_0) = U_i(R, 0) = U_{cp} = \text{const}$ система находится в напряженном состоянии.

Рассматриваемая задача математически может быть сформулирована в виде дифференциального уравнения термоупругости в напряжениях с соответствующими граничными условиями и условиями сопряжения.

$$\frac{d^2\sigma_{\rho i}}{d\rho^2} + \frac{4}{\rho} \frac{d\sigma_{\rho i}}{d\rho} = - \frac{2E_{\rho i} d_{\rho i}}{(1-\mu_i)\rho} \frac{d\theta_i}{d\rho}; \quad (i=1,2,3) \quad (10)$$

$$d\sigma_{\rho 1}|_{\rho=0} = 0; \quad (11)$$

$$\sigma_{\rho 1}|_{\rho=\rho_1} = \sigma_{\rho 2}|_{\rho=\rho_1}; \quad m_{\rho 1}|_{\rho=\rho_1} = m_{\rho 2}|_{\rho=\rho_1}; \quad \sigma_{\rho 2}|_{\rho=\rho_2} = \sigma_{\rho 3}|_{\rho=\rho_2}; \quad (12)$$

$$m_{\rho 2}|_{\rho=\rho_2} = m_{\rho 3}|_{\rho=\rho_2}; \quad \sigma_{\rho 3}|_{\rho=\rho_1} = 0, \quad (13)$$

где $\sigma_\rho = \frac{\sigma}{\sigma_m}$; $E_\rho = \frac{E}{E_m}$; $d_\rho = \frac{d}{d_m}$; $m_\rho = \frac{m}{m_m}$;
 $\rho = \frac{r}{r_3}$; $\theta_i = \frac{(U_i - U_{cp})}{(U_0 - U_{cp})}$; $\sigma_m = E_m d_m (U_0 - U_{cp})$; $m_m = d_m (U_0 - U_{cp}) r_3$; σ_m, E_m, d_m, m_m – масштабные значения величин.

Интегрирование системы уравнений (10) – (13) приводит к следующим соотношениям для определения радиальных и окружных напряжений

$$\sigma_{\rho i}(\rho, F_0) = A_{2i} + \frac{A_{1i}}{\rho^3} - \frac{2E_{\rho i} d_{\rho i}}{(1-\mu_i)\rho^3} \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \rho_2 \theta_i(\rho, F_0) d\rho \quad (14)$$

$$\sigma_{\varphi \rho i}(\rho, F_0) = A_{2i} + \frac{A_{1i}}{2\rho_3} - \frac{E_{\rho i} d_{\rho i}}{1-\mu_i} \cdot \theta_i(\rho, F_0) + \frac{E_{\rho i} d_{\rho i}}{(1-\mu_i)\rho_3} \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \rho_2 \theta_i(\rho, F_0) d\rho, (i = 1, 2, 3) \quad (15)$$

где $\sigma_{\theta \rho} = \frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_m}$; σ_m - масштабные напряжения; F_0 - число Фурье.

Математические модели для расчета перемещений будут иметь вид:

$$m_{\rho i}(\rho, F_0) = \frac{(1-2\mu_i)\rho}{E_{\rho i}} A_{2i} - \frac{(1+\mu_3)A_{1i}}{2E_{\rho i}\rho^2} + \frac{(1+\mu_i)d_{\rho i}}{(1-\mu_i)\rho^2} \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \rho^2 \theta_i(\rho, F_0) d\rho; \quad (16)$$

где $A_{1i}, A_{2i}, (i = 1, 2, 3)$ - постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий и условий сопряжения (11) – (13).

Из условия (11) следует, что $A_{11}=0$. Остальные постоянные найдем из решения следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{21} - \frac{A_{12}}{\rho_1^3} - A_{22} = \frac{2E_{\rho 1} d_{\rho 1}}{(1-\mu_i)\rho_1^3} \int_0^{\rho_1} \rho^2 \theta_1(\rho, F_0) d\rho; \\ \frac{1-2\mu_2}{E_{\rho 2}} A_{22} - \frac{1+\mu_2}{2E_{\rho 2}\rho_1^3} A_{12} - \frac{1-2\mu_1}{E_{\rho i}} A_{21} = \frac{(1+\mu_1)d_{\rho 1}}{(1-\mu_1)\rho_1^3} \int_0^{\rho_1} \rho^2 \theta_1(\rho, F_0) d\rho; \\ \frac{A_{12}}{\rho_2^3} + A_{22} - \frac{A_{13}}{\rho_2^3} - A_{23} = \frac{2E_{\rho 2} d_{\rho 2}}{(1-\mu_2)\rho_2^3} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 \theta_2(\rho, F_0) d\rho; \\ \frac{(1+\mu_2)A_{12}}{2E_{\rho 2}\rho_2^3} - \frac{1-2\mu_2}{E_{\rho 2}} A_{22} - \frac{(1+\mu_3)A_{13}}{2E_{\rho 3}\rho_2^3} + \frac{1-2\mu_3}{E_{\rho 3}} A_{23} = \frac{(1+\mu_2)d_{\rho 2}}{(1-\mu_2)\rho_2^3} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 \theta_2(\rho, F_0) d\rho; \\ \frac{A_{13}}{\rho_3^3} + A_{23} = \frac{2E_{\rho 3} d_{\rho 3}}{(1-\mu_3)\rho_3^3} \int_{\rho_2}^{\rho_3} \rho^2 \theta_3(\rho, F_0) d\rho. \end{array} \right.$$

Проанализировав рассмотренный материал и учитывая, что остываемое изделие уже имеет сплошную твердую структуру, приведем расчетные формулы для определения радиальных и окружных термоупругих напряжений и деформаций, обусловленные неравномерностью распределения температуры на стенках полого шара [2]

$$\sigma_r = \frac{2E\beta}{3(1-\nu)} \cdot [\tilde{U}(1, F_0) - \tilde{U}(\xi, F_0)]; \quad (17)$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E\beta}{3(1-\nu)} \cdot [2\tilde{U}(1, F_0) + \tilde{U}(\xi, F_0) - 3U(\xi, F_0)]; \quad (18)$$

где $\tilde{U}(\xi, F_0) = \frac{3}{\xi^3} \int_0^{\xi} U(\xi, F_0) \cdot \xi^2 d\xi, \quad (0 \leq \xi \leq 1)$.

Рассчитав термоупругие напряжения $\sigma_r, \sigma_{\varphi}$ в радиальном и окружном направлениях, определяем деформации по соответствующим направлениям ξ_r, ξ_{φ} по формулам

$$\xi_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - 2\mu\sigma_{\varphi}) + d_U U;$$

$$\xi_{\varphi} = \frac{1}{E} [(1-\mu)\sigma_{\varphi} - \mu\sigma_r] + d_U U;$$

Значения $U(r, \tau)$ можно определить численным методом конечных разностей по неявной схеме [3].

Список литературы:

1. Кудинов В.А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, В.В. Калашников // Москва «Высшая школа» 2005, - 429 с.
2. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса // Москва. Энергоатомиздат. 1984, - 413с.
3. Фазлутдинова Т.Е. Акимов И.А. Исследование термонапряжений на втором этапе производства композиционных материалов методом полимеризации в установках автоматического ведения технологического процесса/ Т.Е. Фазлутдинова, И.А. Акимов. Перспективы науки, 2015. №6 (69). С.70-73

**АННОТАЦИИ
ABSTRACTS**

Н.С. Блохина, А.Г. Мясников, Т.Н. Титова, В.А. Харитонов,
Н.М. Чиганова, К.С. Шавалиева

АСИМПТОТИКА ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ФИЛЬТРАЦИИ

Ключевые слова: задача фильтрации, суспензия, пористая среда, взвешенные и осаждаемые частицы, асимптотика, обратная задача.

Описание фильтрации суспензии в пористой среде необходимо при укреплении фундамента и создании водонепроницаемого слоя. в нефтедобывающей промышленности, при очистке промышленных и сточных вод. Параметры, задающие математическую модель фильтрации и ее решение, определяются экспериментально. В работе решается обратная задача фильтрации – нахождение коэффициентов асимптотики по значениям концентраций взвешенных и осаждаемых частиц на входе и выходе фильтра. Приводится оценка погрешности метода.

В.В. Дружинин

СТРУКТУРА ЧИСЕЛ ФИБОНАЧЧИ

Ключевые слова: каноническое разложение, числа Фибоначчи. Получены новые формулы связи простых чисел и чисел Фибоначчи, позволяющих получить их каноническое разложение. Найдены формулы генерации простых чисел через золотое сечение. Сделан вывод о бесконечности простых чисел Фибоначчи.

В.Ш. Ройтенберг

**О БИФУРКАЦИЯХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ
КУСОЧНО-ГЛАДКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Ключевые слова: кусочно-гладкое векторное поле, периодическая траектория, бифуркационная диаграмма.

Описаны бифуркации кусочно-гладкого векторного поля коразмерности два в окрестности его периодической траектории, проходящей через точку стыка линий разрыва поля.

А.П. Буйнов

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БАНДАЖЕЙ
КОЛЕСНЫХ ПАР ТЕПЛОВЗОВ В ДЕПО СУРГУТ**

Ключевые слова: тепловоз, колесная пара, бандаж, долговечность, повышение.

В статье на основе выполненного сравнительного анализа износа колесных пар тепловозов в локомотивном депо Сургут предложено повысить ресурс бандажей за счет применения бандажей марки IV.

О.А. Кулаков

**ОБОСНОВАНИЕ НОВОЙ МЕТОДИКИ
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ
КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ АВТОМОБИЛЯ КАМАЗ В
ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Ключевые слова: первичный вал, вторичный вал, опорные подшипники, изнашивание, прецессия, новый структурный параметр, диагностирование.

В работе обосновывается использование в качестве структурного параметра прецессии оси вторичного вала при изнашивании опорных подшипников коробки перемены передач при бортовом диагностировании.

Ю.И. Лесникова, О.Ю. Сметанников, А.Н. Труфанов
**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО
ТЕРМОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОПТИЧЕСКОЕ
ВОЛОКНО В ПОЛИМЕРНОМ ЗАЩИТНО-
УПРОЧНЯЮЩЕМ ПОКРЫТИИ**

Ключевые слова: анизотропное волокно, полимерное покрытие, контактное воздействие, релаксация.

N.S.Blokhina, A.G.Myasnikov, T.N.Titova, V.A.Kharitonov,
N.M.Chiganova, K.S.Shavaliyeva

ASYMPTOTICS OF THE INVERSE FILTRATION PROBLEM

Keywords: filtration problem, suspension, porous medium, suspended and precipitated particles, asymptotic, inverse problem.

Analysis of the regularities of filtration process by porous medium is necessary for solving the problems related to strengthening of constructions foundations, in purification of industrial waste waters, in oil industry. Parameters that define the mathematical filtration model are measured by experiments. In this paper, the authors solved the inverse filtration problem, consisting of finding the coefficients of asymptotics that are determined by the value of concentration of suspended and deposited particles at the inlet and outlet of filter. The method of error estimation is offered.

V.V. Druzhinin

THE STRUCTURE OF THE FIBONACCI NUMBERS

Keywords: canonical decomposition, Fibonacci numbers.

Obtained new formulas for the connection of Prime numbers and Fibonacci numbers, allowing them to obtain a canonical decomposition. The formula generating the Prime numbers using the Golden ratio. The conclusion about the infinity of Fibonacci primes is made.

V.Sh. Roitenberg

**ON BIFURCATIONS OF LIMIT CYCLES OF A PIECEWISE
SMOOTH DYNAMICAL SYSTEM**

Keywords: piecewise smooth dynamical system, periodic trajectory, bifurcation diagram.

We describe bifurcations of a piecewise smooth vector field of codimension two in a neighborhood of its periodic trajectory, passing through a junction point of lines of discontinuity of the vector field.

A.P. Buinov

**INCREASE OF DURABILITY OF BANDAGES OF WHEEL
PAIRS OF LOCOMOTIVES IN THE DEPOT SURGUT**

Keywords: diesel locomotive, wheel pair, bandage, durability, increased.

In article on the basis of comparative analysis of the wear of wheel pairs of locomotives in the locomotive depot Surgut is proposed to increase the resource support through the use of bandages IV brand.

O.A. Kulakov

**THE SUBSTANTIATION OF THE NEW DIAGNOSTIC
METHODOLOGY SUPPORT BEARINGS OF THE KAMAZ
CAR TRANSMISSION UNIT IN OPERATION**

Keywords: primary shaft, secondary shaft, bearing bearings, wear, precession, new structural parameter, diagnosis.

In the paper, the use of the secondary shaft axis as the precession parametric parameter for bearing wear of the gear change box during on-board diagnostics is justified.

Y.I. Lesnikova, O.Y. Smetannikov, A.N. Trufanov
**NUMERICAL MODELING OF CONTACT THERMOPOWER
INFLUENCE TO THE OPTIC FIBER IN THE POLYMER
PROTECTIVE-STRENGTHENING COATING**

Keywords: PM optical fiber, polymer coating, contact action, relaxation

The mathematical model of the evolution of a stress-strain state

Построена математическая модель эволюции напряженно деформированного состояния в анизотропном оптическом волокне типа «Panda» в условиях контактного термосилового нагружения. Установлено, что поля напряжений сформированные при силовой намотке в большей части релаксируют при нагреве и выдержке на первом цикле изменения температуры. Уровень напряжений на втором цикле отличается от первого незначительно, менее чем на 1,5%.

В.П. Новоселов, М.Д. Лукашук, К.Н. Пестов
ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВОГО МЕХАНИЗМА
ПРИВОДА СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Ключевые слова: прокатный стан, динамическая модель, дифференциальные уравнения.

В работе представлена динамическая модель привода стана холодной прокатки труб (ХПТ) с оригинальной конструкцией механизма вращения прокатных валков, а также система дифференциальных уравнений, описывающая поведение исследуемой модели. Дано обоснование результатов выполненного динамического анализа, оценка эффективности и перспектив внедрения новой конструкции.

И.С. Цихалевский, А.П. Буйносов
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
НЕПОДРЕССОРЕННОЙ МАССЫ, ПРИХОДЯЩЕЙСЯ НА
ОДНО КОЛЕСО ЭЛЕКТРОВОЗА ПРИ НАЕЗДЕ НА
НЕРОВНОСТЬ ПУТИ

Ключевые слова: электровоз, масса, колесо, перемещение, путь, неровность, ускорение, определение.

В статье приводятся основные уравнения для расчета ускорения перемещения неподдресоренной массы электровоза, приходящейся на одно колесо колесной пары электровоза при наезде на прямоугольную неровность пути.

В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.В. Таланов
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РОБАСТНОЙ СИЛОВОЙ СХЕМЫ
ТРЕХУРОВНЕВОГО ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА ДЛЯ
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ 15 КВт

Ключевые слова: робастность, инвертор, асинхронный двигатель, корректор коэффициента мощности.

Выполнен анализ силовой схемы трехуровневого трехфазного инвертора. Проведено исследование робастности схемы при изменении: перегрузки, индуктивности входного синус-фильтра, выходной нагрузки.

А.Г. Шляхова, А.Т. Шляхов
ЭКСТРЕМУМ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТ
УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ В АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Ключевые слова: GaAs, Te, влияние легирования, концентрация, компенсация, подвижность,

фотолюминесценция, температура, примесные комплексы, вакансии V_{Ga} и V_{As} , рассеяние, немонотонные зависимости.

Представлены результаты исследования электрофизических и люминесцентных свойств монокристаллов GaAs, легированных Te с концентрацией носителей заряда $n=10^{17}-7\cdot10^{18}\text{ см}^{-3}$. Получены немонотонные концентрационные зависимости степени компенсации, интенсивностей примесных и «краевой» полос рекомбинационного излучения, рассеяния свободных носителей заряда. Полученные данные интерпретируются как результат влияния легирующей примеси на перераспределение вакансий по подрешеткам кристалла, приводящее при $n\approx 2\cdot10^{18}\text{ см}^{-3}$ к смене ансамбля структурных примесных дефектов.

in PM optical Panda-type fiber under conditions of contact thermopower loading is constructed. It is established that the stress fields formed during power winding are mostly relaxed during heating and soaking on the first cycle of temperature change. The stress level in the second cycle differs from the first slightly, by less than 1.5%.

V.P. Novoselov, M.D. Lukashuk, K.N. Pestov
DYNAMIC ANALYSIS OF A CYCLIC MECHANISM
DESIGNED FOR DRIVES OF TUBE COLD-ROLLING
MILLS

Keywords: rolling mill, dynamic model, differential equations.

The paper presents the dynamic model of the cold rolling mill drive with the original design of the rotation mechanism of the rolling rolls, as well as a system of differential equations describing the behavior of the model under study. The justification of the results of the performed dynamic analysis, evaluation of the efficiency and potential for the implementation of the new design are given.

I.S. Tsikhalevsky, A.P. Buinosov
DETERMINING ACCELERATION OF MOVEMENT OF THE
UNSPRUNG MASS PER WHEEL OF THE LOCOMOTIVE
AT ARRIVAL ON ROUGHNESS OF THE WAY

Keywords: locomotive, weight, wheel, move, path, roughness, acceleration, determination.

The article presents the basic equations for calculating the motion acceleration of the unsprung mass of the locomotive falling on one wheel of wheel couple of locomotive when hitting the rectangular roughness of the way.

V.Y. Artamonov, N.V. Dubov, M.V. Talanov
DESIGN OF ROBUST POWER CIRCUIT OF THREE-LEVEL
THREE-PHASE INVERTER FOR 15 kW INDUCTION
MOTOR

Keywords: robustness, frequency converter, induction motor, power factor corrector.

This paper introduces analysis of the power circuit of a three-level three-phase inverter. In this paper is described a study of the robustness of the scheme when you change: the overload, inductance of the input inductor, the output load.

A.G. Shlyakhova, A.T. Shlyakhov
EXTREMUM OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES FROM
THE LEVEL OF DOPING IN GALLIUM ARSENIDE

Keywords: GaAs: Te, the influence of doping, concentration, compensation, mobility, photoluminescence, temperature, impurity complexes, vacancies V_{Ga} and V_{As} , scattering, non-monotonic dependence.

Presents research results of electrophysical and luminescent properties of single crystals of GaAs doped with Te to a concentration of charge carriers $n=10^{17}-7\cdot10^{18}\text{ cm}^{-3}$. Obtained nonmonotonic concentration dependence of the degree of compensation, the intensities of the impurity and the "boundary" of the bands of the recombination radiation, scattering of free charge carriers. The data obtained are interpreted as the result of the influence of the dopant redistribution vacancies in sublattices of the crystal, resulting in at $n\approx 2\cdot10^{18}\text{ cm}^{-3}$ to a change in the structural ensemble of impurity defects.

В.Л. Акимов, А.С. Дюлина, М.В. Таланов
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ АСИНХРОННОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Ключевые слова: асинхронный электропривод, векторное управление, преобразователь частоты, крутящий момент, потокоосцепление ротора.

В данной работе рассматривается система векторного управления электроприводом насосной установки. Исследуется работа предложенной системы управления в среде Matlab/Simulink.

И.А. Акимов, В.А. Урбан
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ ТЕПЛООБМЕНА НА
ПЕРВОМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ
ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Ключевые слова: теплообмен, полимеризация, многослойные конструкции, сферическая форма, этапы производства, авиационная и космическая техника.

В работе рассматривается теплообмен в производстве многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации в автоклавах. Такие изделия широко используются в авиационной промышленности и космической технике.

В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.В. Таланов
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ КОРРЕКТОРОВ
КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ С
ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ И С СИСТЕМОЙ
УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИ ОДНОГО ЦИКЛА ДЛЯ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, спектр потребляемого тока, преобразователь частоты, управление внутри одного цикла, система автоматического управления. Выполнены расчеты и анализ кривых входных токов корректоров коэффициента мощности с разными топологиями. Проведен спектральный анализ тока, потребляемого из сети.

Е.И. Васильева, В.О. Каледин
АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА СКОРОСТЕЙ НА
РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В КАВЕРНЕ
Ключевые слова: вязкая сплошная среда, поля скоростей, коэффициент вязкости, метод конечных элементов, каверна. Предложено решение задачи о течении жидкости в каверне. Расчёты выполнены для двумерной задачи. При численном моделировании была использована модель вязкой сплошной среды. В качестве метода решения задачи выбран метод конечных элементов. Результаты расчёта сопоставляются с известными данными.

И.Н. Голяшкова, В.В. Андреев
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КРИВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, гидравлическая кривая, обобщенная зависимость, приведенные параметры, прогнозирование, циркуляционный контур. В статье рассматривается методика прогнозирования гидравлического сопротивления в переходных областях гидравлических кривых. В предлагаемой методике используются результаты обобщения экспериментальных данных, полученных при проливке гидравлических контуров различной степени сложности. Разработанная методика позволяет сократить объем экспериментальных исследований по проливке вновь проектируемых циркуляционных контуров на основе использования полученных обобщенных зависимостей приведенных показателей гидравлического сопротивления.

V.L. Akimov, A.S. Dyulina, M.V. Talanov
DEVELOPMENT OF VECTOR CONTROL SYSTEM
OF FREQUENCY CONVERTER IN ASYNCHRONOUS
ELECTRIC DRIVE OF PUMPING UNIT

Keywords: asynchronous drive, vector control, frequency converter, torque, rotor flux-linkage.

This paper introduces the vector control system of the pump unit drive. This paper presents modeling results of the proposed control system in Matlab/Simulink.

I.A. Akimov, V.A. Urban
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL
MODELS FOR CALCULATION FORMULAS OF HEAT
TRANSFER AT THE FIRST STAGE OF PRODUCTION OF
MULTILAYER STRUCTURES OF SPHERICAL SHAPE
WITH A POLYMERIZATION

Keywords: heat transfer, polymerization, multilayer structures, of spherical form, the stages of production, aviation and space technology.

The paper deals with heat exchange in the production of multilayer structures of spherical shape by polymerization in autoclaves. Such products are widely used in the aviation industry and space technology.

V.Y. Artamonov, N.V. Dubov, M.V. Talanov
COMPARATIVE ANALYSIS OF POWER FACTOR
CORRECTORS WITH PROPORTIONAL REGULATOR AND
WITH ONE CYCLE CONTROL OF FREQUENCY
CONVERTER OF PUMPING UNIT

Keywords: power factor corrector, current consumption spectrum, frequency converter, one cycle control, automatic control system.

This paper introduces calculations and analysis of input current curves of power factor correctors with different topologies. The spectral analysis of the line current is described.

E.I. Vasileva, V.O. Kaledin
APPROBATION OF THE METHODS OF CALCULATION OF
SPEEDS ON THE DECISION OF THE PROBLEM OF THE
LIQUID CURRENT FLOW IN CAVERNA

Keywords: viscous solid medium, velocity fields, coefficient of viscosity, finite element method, cavity.

A solution of the problem of fluid flow in a cavity is proposed. The calculations are performed for a two-dimensional problem. In the numerical simulation, the model of a viscous continuous medium was used. As a method of solving the problem, the finite element method is chosen. The results of the calculation are compared with the known data.

I.N. Golyashkova, V.V. Andreev
FORECASTING OF HYDRAULIC RESISTANCE CURVES
ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA
GENERALIZATION

Keywords: pressure drop, hydraulic curve, generalized dependence, generalized parameters, forecasting, circulation loop.

The article presents the forecasting technique of hydraulic resistance in the transition areas of the hydraulic curves. In the proposed method uses the results of generalization of experimental data obtained by pouring the hydraulic circuits of various degrees of complexity. The developed method allows to reduce the amount of experimental studies on pouring the newly designed circulation circuits based on the use of the obtained generalized dependences of the indicators of hydraulic resistance.

В.М. Градов, И.А. Желаяев, С.С. Коробков
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В
РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ
ИСТОЧНИКАХ ИЗЛУЧЕНИЯ С КСЕНОНОВЫМ
НАПОЛНЕНИЕМ

Ключевые слова: математическое моделирование, спектр, КПД излучения, оптические свойства.

На основе реалистичной математической модели ксенонового источника излучения выполнено исследование временных зависимостей тока, напряжения на конденсаторе и на разрядном промежутке, спектральных распределений энергии излучения и долей излучения в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Результаты моделирования и измерений находятся в удовлетворительном согласии при длительностях импульса, начиная от 100-120 мкс.

В.М. Градов, И.А. Желаяев, С.С. Коробков
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ОБОЛОЧЕК
ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В
ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Ключевые слова: математическое моделирование, температура оболочек, потери энергии на стенке, периодический режим, разряд.

Методами математического моделирования получены данные о структуре баланса мощности потерь на оболочке разрядного ксенонового источника излучения в процессе развития разряда. Исследованы температурные поля в стенке в зависимости от времени в течение импульса, энергии разряда, частоты следования импульсов. Делаются выводы о работоспособности источников излучения в контексте обеспечения основных эксплуатационных характеристик: предельной энергии и долговечности.

И.Р. Давлетшин, Л.А. Симонова, В.В. Абрамова
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ НАДСТРОЙКА СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПО
ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА
ОСНОВЕ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Ключевые слова: многоагентная система, нейронная сеть, искусственный интеллект, интеллектуальная надстройка, нечеткая логика, база прецедентов.

В статье описана принципиальная структурная модель интеллектуальной информационной системы управления технологическим процессом. Система управления состоит из трех уровней: первые два - традиционные для систем управления, третий - интеллектуальная надстройка. Последний уровень берет на себя функции эксперта/оператора. База знаний надстройки формируется на основе многоагентной системы и базы прецедентов (готовых сценариев работы системы). В систему входят агенты двух типов: первые работают на основе нечеткой логики, а вторые на основе нейронной сети.

А.А. Емельянов, В.В. Малышев, Нгуен Виет Хоай Нам, А.В. Старков
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
НАЗЕМНОГО СЕГМЕНТА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЗЗ В
ЧАСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ

Ключевые слова: математическая модель, обработка данных, ДЗЗ, распределение ресурсов, эффективность, время, стоимость, наземный сегмент.

Представлены математические модели основных процессов при моделировании функционирования наземного сегмента обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), которые могут быть положены в основу специализированного программного обеспечения. Формулируется задача распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям наземной инфраструктуры. Проводится декомпозиция, определяется перечень и формируются модели,

V.M. Gradov, I.A. Zhelayev, S.S. Korobkov
MATHEMATICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL
INVESTIGATION OF PROCESSES IN DISCHARGE PULSE
PERIODIC SOURCES OF RADIATION WITH FILLING OF
XENON

Keywords: mathematical simulation, spectrum, radiation efficiency, optical properties.

Investigation of the time dependences of the current, voltage on the capacitor and on the discharge gap, spectral distributions of the radiation energy, and the radiation efficiency in the ultraviolet and infrared regions of the spectrum is based on a realistic mathematical model of the emission source with xenon. The results of simulation and measurements are in satisfactory agreement at pulse durations starting from 100-120 microseconds.

V.M. Gradov, I.A. Zhelayev, S.S. Korobkov
MODELING OF THERMAL REGIME OF SHELLS OF GAS
DISCHARGE RADIATION SOURCES IN PULSED-
PERIODIC OPERATION MODES

Keywords: mathematical modeling, shell temperature, energy loss on the wall, periodic mode, discharge.

Data on the structure of the power balance of the losses on the shell of radiation source on the xenon during the process of the discharge are obtained by methods of mathematical modeling. The temperature fields in the wall as a function of time during the pulse, discharge energy, pulse repetition frequency are investigated. Conclusions on the efficiency of radiation sources are made in the context of ensuring basic performance characteristics, such as marginal energy and durability.

I.R. Davletshin, L.A. Simonova, V.V. Abramova
INTELLIGENT MANAGEMENT SYSTEM
SUPERSTRUCTURE AUTOMATIC LINE FOR THE
PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS BASED ON
MULTI-AGENT SYSTEMS

Keywords: multiagent system, neural network, artificial intelligence, intelligent add-in, fuzzy logic, the database of precedents.

The article describes the fundamental structural model of the system of management of production process. The control system consists of three levels: the first two - the traditional management systems, the third - the intellectual superstructure. The last level takes on the role of expert/operator. Multiagent system underlying the superstructure has at its disposal a database of precedents (ready-to-use scenarios of the system). The system consists of agents of two types: the first work based on fuzzy logic and the second based on neural network.

A.A. Emel'yanov, V.V. Malyshev, V.H.N. Nguyen, A.V. Starkov
MATHEMATICAL MODEL OF FUNCTIONING OF THE
GROUND SEGMENT IN DISTRIBUTED REMOTE SENSING
DATA PROCESSING

Keywords: mathematical model, data processing, remote sensing, resource allocation, efficiency, time, cost, ground segment

This paper presents mathematical models of the main processes in function modeling of the ground segment for remote sensing data processing, which can be the basis for specialized software. Formulate the problem of target information distribution from the different types of remote sensing satellites to the ground based infrastructure components. Performed decomposition, defined and formed models, the combination of which will make it possible to build a unified mathematical model for the functioning of the ground segment in the targeted information distribution process.

объединение которых позволит построить единую математическую модель функционирования наземного сегмента в части распределения целевой информации;

А.Н. Заикин, Е.Г. Рыжикова
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Ключевые слова: вычислительные эксперименты, непараметрические критерии, статистический анализ.

Представлены результаты вычислительного эксперимента по исследованию производственных процессов, выполняемых комплектами машин. Предложен подход к статистическому анализу регрессионных моделей с использованием параметрических и непараметрических критериев.

В.М. Коржук, Патрик Бонковски, И.М. Шилов
ИДЕНТИФИКАЦИЯ АТАК НА БЕСПРОВОДНЫЕ
СЕНСОРНЫЕ СЕТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
АНОМАЛЬНОГО ПОВЕДЕНИЯ СЕТИ

Ключевые слова: информационная безопасность, беспроводные сети, сенсорные сети, идентификация атак, аномальное поведение.

В статье описан разрабатываемый метод идентификации атак на сенсорные сети. Выбраны признаки, характеризующие различные атаки на информационную безопасность беспроводных сенсорных сетей; разработано признаковое пространство. Проведен анализ и выбран наиболее подходящий для поставленных условий и целей метод машинного обучения. Результаты могут быть использованы в системах мониторинга информационной безопасности и системах обнаружения вторжений.

В.А. Соловьев, Н.Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет, В.В. Тетерин
ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХТОЧЕЧНОГО УЗЛА
ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТИПА

Ключевые слова: взаимосвязанная система, математической модели, объемное формирование, изгиб.

В статье рассматриваются построение имитационного модели трехточечной взаимосвязанной системы формования листового материала в среде MatLab. Процесс формования можно считать как процесс изгиба и силовое воздействия на листовый материал вынуждает рассматривать систему управления электроприводами как взаимосвязанную. Результаты переходного процесса трехточечного узла взаимосвязанной системы регулирования показанны.

Т.Е. Фазлутдинова, И.А. Акимов, А.И. Акимов
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ И
ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ
ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Ключевые слова: многослойные конструкции, полимеризация, термоупругие напряжения и деформации, математические модели, сферическая форма.

В работе приводится разработка математических моделей термоупругих напряжений и деформаций, методы их расчета в производстве многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации

A.N. Zaikin, E.G. Ryzhikova
ANALYSIS OF THE RESULTS OF COMPUTATIONAL
EXPERIMENTS WITH THE NONPARAMETRIC
Keywords: computer experiments, nonparametric tests, statistical analysis.

The results of computational experiment to study the production processes carried out by sets of machines. The proposed approach to the statistical analysis of regression models using parametric and nonparametric criteria.

V.M. Korjuk, P.Bankovski, I.M. Shilov
IDENTIFICATION OF ATTACKS ON WIRELESS SENSOR
NETWORK ON THE BASIS OF ABNORMAL BEHAVIOUR
ANALYSIS

Keywords: information security, information protection, wireless network, sensor network, attack identification, abnormal behaviour.

This paper described developing method of sensor network attack identification. The features characterizing different attacks on information security of wireless sensor networks are selected; feature set is composed. The analysis carried out the matching method of machine learning for the given conditions and purposes. Results can be used in information security monitoring systems and intrusion detection systems.

V.A. Solovyov, N.E. Deryuzhkova, Kyaw Aung Htet,
V.V. Teterin
ELECTROMECHANICAL TYPE SIMULATION MODEL OF
THREE-POINT-BEND FORMING PROCESS OF SHEET
MATERIAL

Keywords: interconnected system, mathematical model, bulk forming, bending.

The article deals with the designing of simulation model for three-point interconnected system of forming sheet material in the MatLab environment. The forming process can be considered as a bending process and the acting force on the sheet material represented the control system of electric drives as interconnected system. The results of the transient process of the three-point bend interconnected control system are shown.

T.E. Fazlutdinova, I.A. Akimov, A.I. Akimov
RESEARCH AND DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL
MODELS AND THERMO-ELASTIC STRESSES AND
STRAINS IN THE PRODUCTION OF MULTILAYER
STRUCTURES OF SPHERICAL SHAPE WITH A
POLYMERIZATION

Keywords: multilayered structure, polymerization, thermal stress and deformation, mathematical models, spherical shape
The paper presents the development of mathematical models of thermoelastic stresses and strains, methods of their calculation in the production of multilayer structures of spherical shape by polymerization

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" 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 2018

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 20.02.2018 Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

5,6 усл.печ.л. 6,4 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 1005.

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»