

СОДЕРЖАНИЕ

Физика

Мемристорные свойства тонкопленочных наноконпозитов $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$	
Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.В. Рыльков, К.Г. Королев, Г.С. Рыжкова..	4
Моделирование формования композитов на основе терморезактивных матриц	
М.В. Козлов, С.В. Шешенин, А.В. Бабкин, А.В. Кепман, А.М. Кудрин.....	11
Получение многослойных наноструктур Mg/NbO	
О.В. Стогней, А.В. Ситников, А.Н. Смирнов, К.И. Семенов,	
В.В. Черниченко.....	18
Структурные и оптические свойства пленок CdS, легированных ионами меди и натрия	
А.Н. Нитуга, В.Н. Семенов, Л.Н. Никитин, А.Н. Лукин, Д.А. Минаков,	
О.В. Ребенок.....	24
Магнитостатические и магнитодинамические свойства многослойных систем на основе наноконпозитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$	
А.Б. Грановский, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.С. Тарасова,	
В.В. Филиппов.....	30
Влияние добавок Si, Zr и Y на структуру, электрические и газосенсорные свойства пленок SnO ₂	
О.И. Ремизова, И.В. Бабкина, А.В. Ситников, Л.И. Янченко.....	38

Информатика, вычислительная техника и управление

Построение моделей косвенного контроля в информационно-управляющих вычислительных системах	
С.Л. Подвальный.....	44
Технология разработки сложных программных систем управления предприятием на основе методов многовариантной интеграции	
А.А. Рындин, С.В. Сапегин.....	52
Адаптивное интеллектуальное проектирование радиоэлектронных средств	
В.В. Колуков, Ю.С. Сахаров, В.Н. Кострова.....	57
Верификация и тестирование сложных программных продуктов на основе нейросетевых моделей	
А.Д. Данилов, В.М. Мугатина.....	62
Алгоритмизация выбора показателей эффективности деятельности вуза для управления его положением в рейтинговой системе	
В.В. Горячко, В.Н. Кострова, И.Я. Львович.....	68
Методы обеспечения устойчивости системы аварийной защиты и управления ЖРД к отказам средств измерения	
С.М. Пасмурнов, Д.Ю. Якуш.....	73

Энергетика

Концепция безаварийного управления на основе моделей прогнозирования состояний потенциально опасных технологических процессов	
С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский, О.Ю. Таратынов.....	79
Анализ плотности температурных режимов механотронной аппаратуры в негерметизированных электротехнических комплексах	
А.И. Борисова, В.Л. Бурковский	87

Управление робототехническим комплексом в экстремальных условиях функционирования на основе нечетких нейронных сетей В.Ж. Бочаров, В.Л. Бурковский	90
--	-----------

Радиотехника и связь

Оптимизация процессов проектирования радиоэлектронных модулей третьего уровня средствами CREO PARAMETRIC 3.0 П.В. Иевлев, А.В. Муратов, С.А. Слинчук, Т.Л. Тураева, А.В. Турецкий.....	96
Автоматизированная установка для задания тепловых режимов при термоэлектрической тренировке полупроводниковых приборов В.В. Кондусов, В.А. Кондусов.....	104
Оценка требуемой концентрации углеродисто-волоконистых материалов в аэрозольном образовании при прерывании радиолинии управления в миллиметровом диапазоне волн М.Г. Калашников, С.В. Утемов, В.Г. Керков.....	107

Машиностроение и машиноведение

Повышение циклической долговечности азотированного титана В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, А.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин.	110
Особенности организации учета и оценки затрат на качество на предприятиях машиностроения М.И. Самогородская, С.А. Самогородская.....	116
Оценка показателей результативности процессов функционирования на предприятиях машиностроения Е.П. Енина.....	126

МЕМРИСТОРНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$

Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, В.В. Рыльков, К.Г. Королев, Г.С. Рыжкова

Методом ионно-лучевого распыления синтезированы пленки наноконкомпозитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ и $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ толщиной 4-5 мкм. Осаждение проводилось при комнатной температуре на ситалловые подложки в атмосфере аргона с добавлением в рабочий газ кислорода с парциальным давлением 2,2 %. С использованием теневых масок сформированы структуры металл-наноконкомпозит-металл для изучения транспортных свойств пленок в сильных электрических полях ($>10^4$ В/см) в поперечной (вертикальной) геометрии. В результате исследований установлено, что обратимое изменение электрического сопротивления образцов при воздействии сильных электрических полей наблюдается при концентрации металлической фазы до порога перколяции. Введение кислорода 2,2 пар. % к давлению рабочего газа (аргона) при напылении пленки композита $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ увеличивает эффект резистивного переключения до 4000 % и смещает концентрацию металлической фазы, соответствующей максимальному отклику системы, в область больших значений $x \approx 60 \div 75$ ат. %

Ключевые слова: мемристор, наноконкомпозит, удельное электрическое сопротивление, сильное электрическое поле

Введение

Эффект переключения электрического сопротивления в некоторых материалах, заключающийся в обратимом переходе между высоко- и низкоомными состояниями под действием сильного электрического поля и протекающего заряда называется мемристорным, а элемент с данными свойствами мемристором (сокр. от «memory resistor» - резистор с памятью) [1-3]. Необходимым условием наличия у материала мемристорных свойств является обнаружение в нем нелинейных вольтамперных характеристик (ВАХ), обладающих гистерезисом. Хотя такого рода ВАХ были обнаружены в оксидных системах более 50 лет назад [1-3], а в наноконкомпозитах металл-диэлектрик более 10 лет [4-7], идея использовать мемристоры для создания адаптивных вычислительных систем (или био-подобных – «bio-inspired»), а также многоуровневых элементов памяти, возникла сравнительно недавно [8-10].

Обычно в качестве функциональной структуры для исследования мемристорного эффекта выбирают геометрию конденсатора металл-диэлектрик-металл (МОМ) [11]. Диэлектрической фазой в МОМ структурах выступают такие оксиды металлов, как NiO [12], TiO₂ [13-16], BiFeO₃ [17,18], Cr₂O₃ [19] и др. В свою очередь оксидные пленки (обычно толщиной 10-50 нм) формируются двухслойными: один из слоев является предельным оксидом, а другой – соединением с недостатком атомов кислорода [1-3,

20]. Основным механизмом изменения величины электрического сопротивления такой многослойной структуры является образование проводящих каналов при электромиграции кислородных вакансий в диэлектрической среде [1-3]. Важную роль в МОМ структурах играют восстановительно-окислительные («redox») реакции. По этой причине в качестве металлических контактов обычно используют инертные металлы (Au или Pt) [1-3].

В данной работе представлены результаты исследования мемристорных свойств структур типа МОМ, в которых оксид заменен композитом $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ или $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ толщиной 4-5 мкм, а в качестве контактов использована медь. Оказалось, что такого рода структуры демонстрируют многократно воспроизводимый эффект резистивного переключения величиной до 4000 %.

Выбор элементного состава наноконкомпозитных систем был основан на нескольких предположениях. Во-первых, наиболее распространенным диэлектриком для создания структур, обладающих высокими значениями мемристорного эффекта, является оксид титана. Электромиграция кислородных вакансий под действием высоких значений напряженности электрического поля приводит к образованию проводящих каналов в TiO₂, а источником этих дефектов выступает слой нестехиометрического оксида TiO_{2-x}. Следовательно, концентрация кислорода в диэлектрической фазе исследуемых композитных систем должна являться существенным фактором, влияющим на нелинейные и гистерезисные эффекты в композите. Изменение концентрации кислорода в наноконкомпозитах осуществляется добавлением O₂ в инертную рабочую атмосферу ионно-лучевого источника распыления в процессе осаждения гетерогенной пленки. Следующим, рассматриваемым в работе, фактором является наличие атомов бора. Атомы В имеют малый размер и высокую диффузионную подвижность. Поэтому можно предположить, что они будут активно участвовать в процессах электромиграции. При этом невысокое значение

Калинин Юрий Егорович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: kalinin48@mail.ru
Ситников Александр Викторович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sitnikov04@mail.ru
Рыльков Владимир Васильевич – НИЦ «Курчатовский институт», д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, e-mail: vvrylkov@mail.ru
Королев Константин Геннадьевич - ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: korolev.kg@mail.ru
Рыжкова Галина Сергеевна – ВГТУ, студент, e-mail: sitnikov04@mail.ru

энтальпии образования простейшего оксида ВО позволяют атомам бора связывать кислород при его диффузии в диэлектрической матрице, что должно способствовать увеличению содержания дефектов типа кислородных вакансий. С другой стороны, бор, являясь элементом с предельной валентностью V^{+3} и замещая в узле оксидной матрицы Ti^{+4} , будет приводить к дефекту противоположного знака (отрицательного) по отношению к кислородной вакансии. Выявить влияние бора на электрические свойства композитов в сильных электрических полях, также являлось целью представленных ниже исследований.

Образцы и методика эксперимента

Для измерения электрических свойств композитных пленок была изготовлена на ситалловой подложке структура металл – нанокompозит – металл. Вначале на подложку наносили нижний металлический контакт, которым являлась пленка меди толщиной 1 мкм. Через теньевую маску методом ионно-лучевого распыления составной мишени осаждали композит [21]. Мишень представляла из себя металлическую пластину либо Co , либо сплава $Co_{41}Fe_{39}B_{20}$ размером $280 \times 80 \times 15 \text{ мм}^3$ с закрепленными на ее поверхности 13 пластинами керамики TiO_2 размером $80 \times 10 \times 3 \text{ мм}^3$, расположенных неравномерно. Составная мишень крепилась на водоохлаждаемое медное основание. В одном цикле напыления в качестве подложки использовали 4 ситалловых пластины размером $60 \times 48 \times 0,6 \text{ мм}^3$, которые располагались в виде полоски размером $240 \times 80 \text{ мм}^2$ на расстоянии $\sim 70 \text{ мм}$. Длинные оси подложки и мишени совпадали. Неравномерное расположение на поверхности мишени TiO_2 навесок и соосное размещение мишени и подложки позволило в едином цикле нанесения формировать композит с различным соотношением металлической и диэлектрической фаз по длине подложки.

В качестве маски при осаждении композитного слоя использовали металлическую пластину размером $240 \times 48 \text{ мм}^2$ с отверстиями диаметром 5 мм, которые располагались 24 рядами по 6 отверстий в ряду. Состав композита варьировался от ряда к ряду и имел 24 градации. Толщина композита составляла 4-5 мкм. Верхние контактные площадки наносили также через металлическую маску с размером отверстий $0,5 \times 0,2 \text{ мм}^2$. Толщина верхнего медного контакта составляла около 1 мкм. При измерениях ВАХ использовали зондовая станция с микрометрической системой перемещения зондов.

Элементный состав пленок определяли с помощью энергодисперсионной рентгеновской приставки Oxford INCA Energy 250 на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380 LV. Элементный состав, диапазон изменения металлической фазы композита и режимы распыления представлены в табл.

Для измерений электрических свойств пленок композитов в сильных электрических полях была разработана автоматизированная установка на базе источника программируемого питания MOTECH.

Для автоматизации процесса измерения и сбора данных было разработано программное обеспечение с использованием среды LabVIEW.

Элементный состав, диапазон изменения металлической фазы, режимы распыления нанокompозитов

Партия	1473	1479	1503
Формульное обозначение	$Co_x(TiO_2)_{100-x}$	$Co_x(TiO_2)_{100-x}+O_2$	$(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(TiO_2)_{100-x}$
Диапазон изменения металлической фазы			
x, ат. %	37,9÷76,8	37,9÷76,8	15,3÷71,0
Режимы получения			
P_{Ar} , Торр	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
P_{O_2} , Торр	10^{-5}	$1,6 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
d, мкм	5	5	4
U_s , кВ	2,4	2,0	2,4
I_s , мА	100	130	90
$I_{ком}$, А	2,7	2,7	4,0

P_{Ar} – рабочее давление аргона, P_{O_2} – давление кислорода в процессе осаждения, d – толщина пленки нанокompозита, U – напряжение на аноде, I – ток плазмы, $I_{ком}$ – ток компенсатора заряда на мишени.

В этой среде содержится полный набор инструментов для сбора, обработки, представления и хранения данных эксперимента. Разработанная программа реализует два режима измерения ВАХ. В первом случае задается максимальное напряжение смещения на структуре, шаг изменения напряжения и время выдержки в каждом шаге программы. Временная зависимость напряжения смещения на структуре показана на рис. 1.

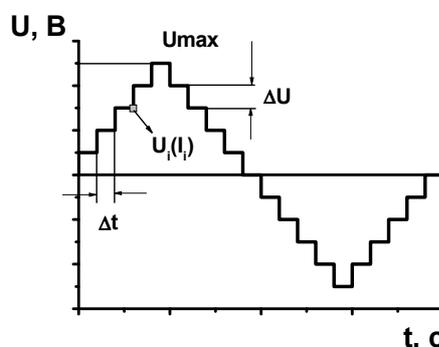


Рис. 1. Временная зависимость изменения напряжения смещения на образце (режим 1)

Измерения тока и напряжения при текущем значении проводили в конце цикла полевого воздействия в каждом шаге изменения напряжения на образце. Текущие значения $U_i(I_i)$ отображали в виде графика на экране монитора в режиме реального времени и записывали в сформированный файл данных.

Другой режим измерения ВАХ задает более сложный алгоритм изменения напряжения на исследуемом образце (см. рис.2). В этом режиме также фиксируются параметры U_i и I_i после каждого шага изменения напряжения на образце, но кроме того дополнительно после каждого полевого воздействия регистрируются значения тока I_{min} при небольшом напряжении смещения $\pm U_{min}$. Значение напряже-

ния U_{min} задается в программе и выбирается из условий линейности ВАХ в данном интервале электрических полей. При данном режиме измерений выводятся графики зависимостей $U_i(I_i)$ и $R_{min_i} = U_{min_i}/I_{min_i}$ от U_i . Последняя характеристика является мерой изменения электрического сопротивления при высокополевом воздействии на образец. Кроме того, программа позволяет задавать ограничение по току (I_{max}), протекающему через образец.

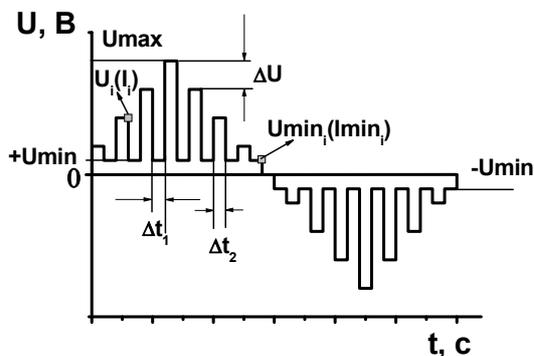


Рис. 2. Временная зависимость изменения напряжения смещения на образце (режим 2)

В этом случае при достижении I_{max} напряжение на образце не изменяется и сохраняет постоянное значение в течение времени, пока U_i не станет меньше величины $U = R_{обр} \cdot I_{max}$.

Кроме того, для изучения мемристорного эффекта была разработана дополнительная программа, позволяющая измерять временные зависимости изменения электрического сопротивления образца при фиксированном полевом воздействии. Временная зависимость полевого воздействия на образец представлена на рис. 3.

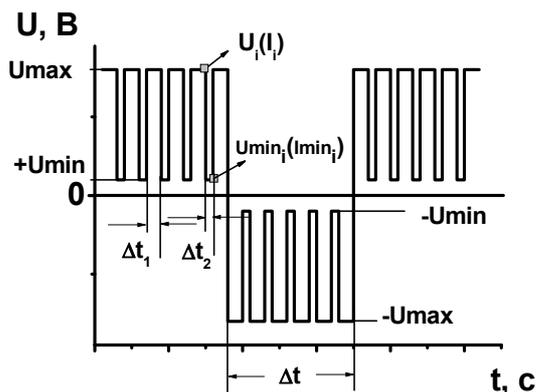


Рис. 3. Временная зависимость изменения напряжения смещения на образце (режим 3)

В программе задается напряжение высокополевого воздействия U_{max} и напряжение измерения электрического сопротивления образца U_{min} . Выбирается временной интервал Δt высокополевого воздействия при постоянной полярности приложенного к образцу напряжения. Внутри данного интервала задается время воздействия Δt_1 напряжением

U_{max} и время измерения Δt_2 при напряжении U_{min} . Такой алгоритм измерений позволяет изучать процесс релаксации электрического сопротивления образца при приложении к нему электрического поля высокой напряженности. Все измеряемые характеристики (t , U_i , I_i , U_{min_i} , I_{min_i} и напряжение, подаваемое на реле) фиксируются в файле данных. На монитор компьютера в режиме реального времени выводится временная зависимость $R_{min_i} = U_{min_i}/I_{min_i}$.

Влияние сильных электрических полей на электрические свойства композитов

Гистерезисный характер ВАХ исследуемого материала является необходимым условием, указывающим на наличие в нем мемристорного эффекта. При измерении ВАХ использовался режим 1 ступенчатого изменения напряжения на образце, показанный на рис. 1. Измерения выявили наличие петли гистерезиса ВАХ во всех нанокompозитных системах, исследуемых в данной работе. В качестве примера на рис. 4 представлена ВАХ композита $Co_{69,2}(TiO_2)_{30,8}$, полученного с добавлением кислорода. При этом величина электрического сопротивления пленки изменяется обратимо (см. рис. 5). Кривая рис. 5 была измерена в режиме 2, используя временную зависимость полевого воздействия, показанную на рис. 2

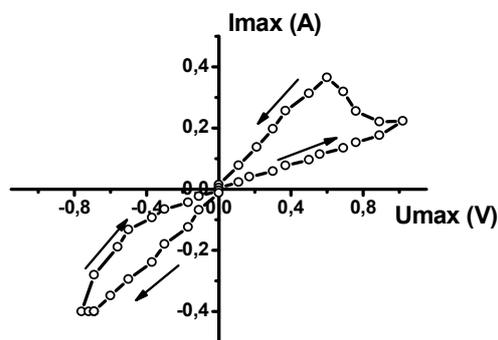


Рис. 4. ВАХ пленок композита $Co_{69,2}(TiO_2)_{30,8}$, полученных при добавлении кислорода $P_{O_2} = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Торр

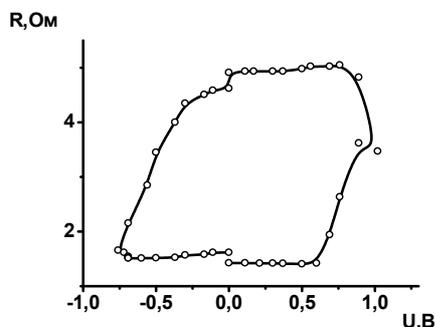


Рис. 5. Зависимость электрического сопротивления пленки композита $Co_{69,2}(TiO_2)_{30,8}$, полученных при добавлении кислорода $P_{O_2} = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Торр, от величины высокополевого воздействия. Измерение проводилось при $U_{min} = 0,1$ В

Для нахождения значений изменения электрического сопротивления композитных пленок различного состава были исследованы временные зависимости электрического сопротивления в режиме 3 (см. рис. 3). При проведении измерений выбирались значения напряжений U_{max} , при которых достигалось максимальное изменение электрического сопротивления. На рис. 6 представлен пример полученных зависимостей.

Используя подобные зависимости для пленок композитов различного состава и концентрации металлической фазы, были рассчитаны величины относительного изменения электрического сопротивления, используя выражение

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(R_{max} - R_{min})}{R_{min}} \cdot 100 \%,$$

где R_{max} и R_{min} – максимальное и минимальное наблюдаемое электрическое сопротивление пленки после полевого воздействия. Полученные результаты сведены в концентрационные зависимости, представленные на рис. 7.

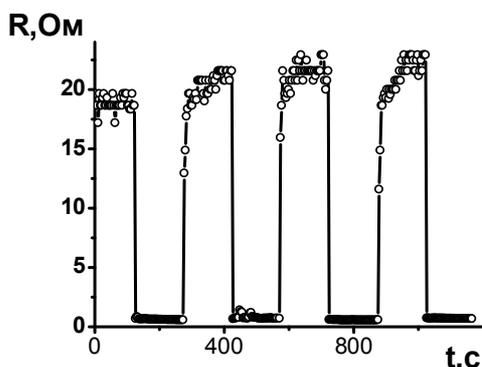


Рис. 6. Временная зависимость электрического сопротивления пленок композита $Co_{69,2}(TiO_2)_{30,8}$, полученного при добавлении кислорода $P_{O_2} = 1,6 \cdot 10^{-5}$ Торр. Измеренные R проводились при $U_{min} = 0,1$ В, $U_{max} = 1$ В

Анализ кривых $\Delta R/R(x)$ показывает, что эффект наблюдается не во всем исследуемом диапазоне концентраций металлической фазы. Относительное изменение электрического сопротивления отсутствует в составах композитов, находящихся после порога перколяции. Это ожидаемый результат, поскольку электроперенос в таких композитах происходит по бесконечному металлическому кластеру из соприкасающихся гранул и диэлектрическая матрица не оказывает влияние на данный процесс. В композитах, расположенных до порога перколяции, лимитирующей электрическую проводимость является диэлектрическая фаза. Возможность создавать в диэлектрике в результате полевого воздействия обратимые структурные изменения, которые влияют на вероятность туннелирования электронов между металлическими гранулами, определяют наличие и величину относительного изменения электрического сопротивления композитов. С одной стороны, полученные результаты подтверждают наше предположение о наличии мемристорного эффекта в композитах до порога перколяции

(рис. 7 а, б), а с другой – отсутствие изменений $\Delta R/R(x)$ при $45 < x < 60$ ат. % (рис. 7 с) на первый взгляд не вполне закономерно. Для интерпретации полученного результата рассмотрим изменение структуры композита при добавлении в рабочий газ кислорода в процессе формирования пленки.

В зависимости от парциального давления реактивного газа происходят два процесса. Во-первых, до-окисляется соединение диэлектрической фазы, и во-вторых, на поверхности металлической гранулы формируется оксидная оболочка из элементов металлической фазы. Схематично данные изменения структуры представлены на рис. 8. Если композит формировался в атмосфере Ar (рис. 8 а), то матрица оксида титана имеет некоторый дефицит по кислороду и соединение можно рассматривать как TiO_n , с $n < 2$.

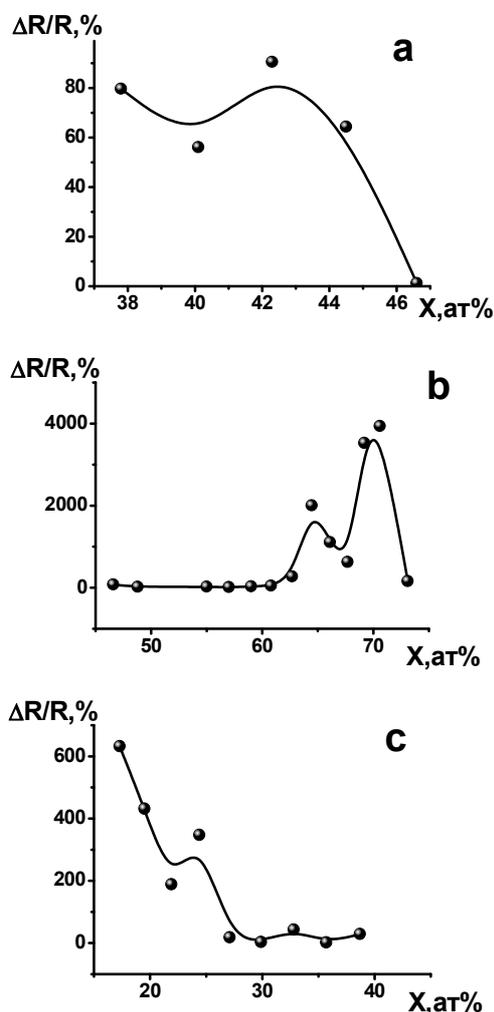


Рис. 7. Концентрационная зависимость относительного изменения сопротивления пленок композитов а – $Co_x(TiO_2)_{100-x}$, б – $Co_x(TiO_2)_{100-x} + O_2$, с – $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(TiO_2)_{100-x}$ после воздействия сильных электрических полей

Обратимое изменение структуры неупорядоченного оксида под действием электрического поля высокого напряжения изменяет проводимость межгра-

нульной среды. При добавлении кислорода матрица доокисляется до состояния предельного оксида TiO_2 (рис. 8 б) и приложенное напряжение не может изменить высокоомное состояние диэлектрика.

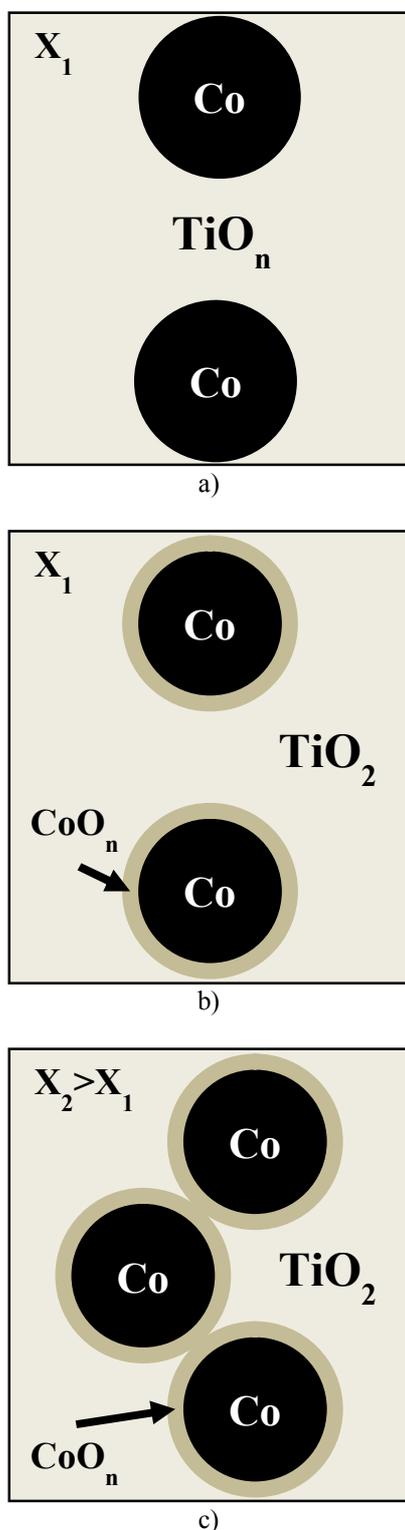


Рис. 8. Схематичное представление структуры пленок композита $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$, полученных в атмосфере а – Ar, б – Ar+O₂, с – Ar+O₂

Когда концентрация атомов металла становится такой, что между гранулами остается прослойка

из оксида кобальта, образованного на поверхности частицы (рис. 8 с), приложенное электрическое поле может существенно изменять электрическую проводимость межгранульной среды. Действительно, известно, что непереломные оксиды переходных металлов (FeO_x , CoO_x , NiO_x) обладают заметными мемристорными свойствами [22].

Отметим, что в нашем случае по причине избытка металлических атомов окисленный слой на поверхности частицы Co не может быть предельным. Видно, что в композите $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ относительное изменение электрического сопротивления под действием сильных электрических полей имеет несколько большую величину, чем в композите $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$, полученном в аналогичных условиях (рис. 7 а и 7 с).

Таким образом, на мемристорные свойства тонкопленочных структур, полученных распылением в среде с добавлением реактивного газа, может влиять не только состав диэлектрической матрицы, но и металлические гранулы, входящие в состав композитного материала.

Заключение

Методом ионно-лучевого распыления синтезированы пленки композитов наночастиц кобальта и сплава $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$ в матрице оксида титана. Проведенные исследования мемристорного эффекта в синтезированных пленках $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$, $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2$ и $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ показали, что обратимое изменение электрического сопротивления образцов при воздействии сильных электрических полей наблюдается при концентрации металлической фазы до порога перколяции. Введение кислорода 2,2 пар. % к давлению рабочего газа аргона при осаждении пленки композита $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ увеличивает мемристорный эффект до 4000 % и смещает концентрацию металлической фазы, соответствующей максимальному отклику системы, в область более высоких значений $x = 60\div 75$ ат. %. В композите $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ изменение электрического сопротивления образцов при воздействии сильного электрического поля более значительное, чем в композите $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$, который получен в тех же условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-19-10233).

Литература

1. Pershin, Y.V. Memory effects in complex materials and nanoscale systems [Текст] / Y.V. Pershin, M. Di Ventra // *Advances in Physics*.– 2011.– V.60(2).– P.145.
2. Lee, J.S. Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches [Текст] / J.S. Lee, S. Lee, T.W. Noh // *Applied Physics Reviews*.– 2015.– V.2(3).– 031303.
3. Ielmini, D. Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling [Текст] / D. Ielmini // *Semicond. Sci. Technol.*– 2016.– V.31.– 063002.
4. Свойства гранулированных нанокompозитов металл-диэлектрик в сильных электрических полях и кластерные электронные состояния [Текст] / Л.В. Луцев, М.Н. Копы-

тин, А.В. Ситников, О.В. Стогней // Физика твердого тела.– 2005.– Т. 47.– Вып. 11.– С. 2080-2090.

5. Диэлектрические и электрические свойства тонкопленочных наногетерогенных структур Co-LiNbO_3 [Текст] / С.А. Гриднев, А.Г. Горшков, М.Н. Копытин, А.В. Ситников, О.В. Стогней // Известия РАН. Серия физическая.– 2006.– Т. 70.– № 8.– С. 1130-1133.

6. Копытин, М.Н. Электрическое сопротивление тонкопленочных композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ в высокополевом режиме [Текст] / М.Н. Копытин, А.В. Ситников, О.В. Стогней // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Материаловедение.– 2003.– Вып. 1.13.– С. 32-37.

7. Копытин, М.Н. Влияние высоких электрических полей на магниторезистивный эффект в гранулированных нанокompозитах $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}\text{-SiO}_n$ [Текст] / М.Н. Копытин, О.В. Стогней, А.В. Ситников // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Материаловедение.– 2005.– Вып. 1.17.– С. 76-79.

8. Strukov, D.B. The missing memristor found [Текст] / D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, R.S. Williams // Nature.– 2008.– V.453.– P. 80-83.

9. Freitas, R.F. Storage-class memory: The next storage system technology [Текст] / R.F. Freitas, W.W. Wilcke // IBM J. Res. & Dev.– 2008.– Vol.52.– № 4-5.– P. 439-447.

10. Ha, S.D. Adaptive oxide electronics: A review [Текст] / S.D. Ha, S. Ramanathan // J. Appl. Phys.– 2011.– V.110 (7), 071101.

11. Пергамент, А.Л. Электронное переключение в тонких слоях оксидов переходных металлов [Текст] / А.Л. Пергамент, С.Д. Ханин // Известия РГПУ им. А. И. Герцена.– 2007.– Т. 7.– № 26.– С. 69-85.

12. Lee, S. R. Role of oxygen vacancies formed between top electrodes and epitaxial NiO films in bipolar resistance switching [Текст] / S.R. Lee, H.M. Kim et al. // Current Applied Physics.– 2012.– Vol. 12.– Is. 2.– P. 369-372.

13. Oxygen ion drifted bipolar resistive switching behaviors in $\text{TiO}_2\text{-Al}$ electrode interfaces [Текст] / Y. Ho Do, J. Sik Kwak et al. // Thin Solid Films.– 2010.– Vol. 518.– P. 4408-4411.

14. TiN electrode-induced bipolar resistive switching of TiO_2 thin films [Текст] / Y. Ho Do, J. Sik Kwak et al. // Current Applied Physics.– 2010.– Vol. 10.– P. 71-74.

15. Freitas, R.F. Storage-class memory: The next storage system technology [Текст] / R.F. Freitas, W.W. Wilcke // IBM J. Res. & Dev.– 2008.– Vol.52.– № 4-5.– P. 439-447.

16. Mähne, H. The influence of crystallinity on the resistive switching behavior of TiO_2 [Текст] / H. Mähne, S. Slesazek et al. // Microelectronic Engineering.– 2011.– Vol. 88.– P. 1148-1151.

17. Chen, S. Unipolar resistive switching behavior of BiFeO_3 thin films prepared by chemical solution deposition [Текст] / S. Chen, J. Wu // Thin Solid Films.– 2010.– Vol. 519.– P. 499-504

18. Nonvolatile bipolar resistive switching in $\text{Au/BiFeO}_3/\text{Pt}$ [Текст] / Y. Shuai, S. Zhou et al. // J. Appl. Phys.– 2011.– Vol. 109.– 124117.

19. Bipolar resistive switching of chromium oxide for resistive random access memory [Текст] / S.-C. Chen, T.-C. Chang et al. // Solid State Electronics.– 2011.– Vol. 62.– Is. 1.– P. 40-43.

20. Weiser TEAM: Threshold Adaptive Memristor Model [Текст] / Kvatinsky Shahar, Eby G. Friedman, Kolodn Avinoam, and C. Uri // IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: regular papers.– 2013.– V. 60.– N. 1.– P.211-221.

21. Структура и электрические свойства аморфных нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ [Текст] / Ю.Е. Калинин, А.Н. Ремизов, А.В. Ситников, Н.П. Самцова // Перспективные материалы.– 2003.– № 3.– С. 62-66.

22. Yang, J.J. Memristive devices for computing [Текст] / J.J. Yang, D.B. Strukov, D.R. Stewart // Nature Nanotechnology.– 2013.– V.8.– P. 13-24.

Воронежский государственный технический университет
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

MEMRISTOR PROPERTIES OF THIN-FILM NANOCOMPOSITES $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$

Yu.E. Kalinin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kalinin48@mail.ru

A.V. Sitnikov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sitnikov04@mail.ru

V.V. Rylkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, National Research Centre «Kurchatov Institute», Kurchatov, Russian Federation, e-mail: vvrylkov@mail.ru

K.G. Korolev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: korolev.kg@mail.ru

G.S. Ryzhkova, Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sitnikov04@mail.ru

Nanocomposite $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ and $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ films with the thickness of 4-5 μm have been deposited by the method of ion-beam sputter deposition. The film deposition has been performed on the glassceramic substrates at the room temperature in the argon atmosphere with addition of oxygen with the partial pressure of 2.2 %. The metal/nanocomposite/metal structures for study of the film transport properties in strong electric fields ($>10^4$ V/cm) have been formed in transverse geometry using shadow masks. Reversible change of the sample resistance at the electric field action has been observed at the metal phase concentration below the percolation threshold. Addition of oxygen with the partial pressure of 2.2 % at the composite $\text{Co}_x(\text{TiO}_2)_{100-x}$ film deposition increases effect of resistive switching up to 4000% and shifts the metal phase concentration appropriate for the system maximum response to the region of greater $x \approx 60\div 75$ at. %

Key words: memristor, nanocomposite, electrical resistivity, strong electric field

References

1. Pershin Y.V., Di Ventra M. Memory effects in complex materials and nanoscale systems // Advances in Physics. – 2011. – V.60(2). – P.145.

2. Lee J.S., Lee S. & Noh T.W. Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches // *Applied Physics Reviews*. – 2015. – V.2(3). – 031303.
3. Ielmini D. Resistive switching memories based on metal oxides: mechanisms, reliability and scaling // *Semicond. Sci. Technol.* – 2016. – V.31. – 063002.
4. Lucev L.V., Kopitin M.N., Sitnikov A.V., Stognei O.V. Svoystva granulirovannykh nanokompozitov metall-dielektrik v sil'nykh elektricheskikh polyakh i klasternyye elektronnyye sostoyaniya [The properties of granular metal-dielectric nanocomposites in strong electric fields and cluster electronic states] // *Fizika tverdogo tela*. – 2005. – Vol. 47. – N. 11. – P. 2080-2090.
5. Gridnev S.A., Gorshkov A.G., Kopitin M.N., Sitnikov A.V., Stognei O.V. Dielektricheskiye i elektricheskiye svoystva tonkoplennokh nanogeterogennykh struktur Co-LiNbO₃ [Dielectric and electrical properties of thin film nano-heterogeneous structures Co-LiNbO₃] // *Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya*. – 2006. – Vol. 70. – № 8. – P. 1130-1133.
6. Kopitin M.N., Sitnikov A.V., Stognei O.V. Elektricheskoye soprotivleniye tonkoplennokh kompozitov (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(SiO_n)_{100-x} v vysokopolevom rezhime [The electrical resistance of the thin film composites (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(SiO_n)_{100-x} in the high-field mode] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Materialovedeniye*. – 2003. – Vol. 1.13. – P. 32-37.
7. Kopitin M.N., Sitnikov A.V., Stognei O.V. Vliyaniye vysokikh elektricheskikh poley na magniterezistivnyy effekt v granulirovannykh nanokompozitakh Co₄₁Fe₃₉B₂₀-SiO_n [Effect of high electric fields on the magnetoresistive effect in granular nano-composites Co₄₁Fe₃₉B₂₀-SiO_n] // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Materialovedeniye*. – 2005. – Vol. 1.17. – P. 76-79.
8. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found // *Nature*. – 2008. – V.453. – P. 80-83.
9. Freitas R.F., Wilcke W.W. Storage-class memory: The next storage system technology // *IBM J. Res. & Dev.* – 2008. – Vol. 52. – № 4-5. – P. 439-447.
10. Ha S.D., Ramanathan S. Adaptive oxide electronics: A review // *J. Appl. Phys.* – 2011. – V.110 (7). – 071101.
11. Pergament A.L., Hanin S.D. Elektronnoye pereklyucheniye v tonkikh sloyakh oksidov perekhodnykh metallov [Electronic switching in thin layers of transition metal oxides] // *Izvestiya RGPU im. A. I. Gertsena*. – 2007. – Vol. 7. – № 26. – P. 69-85.
12. Lee S. R., Kim H. M. et al. Role of oxygen vacancies formed between top electrodes and epitaxial NiO films in bipolar resistance switching // *Current Applied Physics*. – 2012. – Vol. 12. – Is. 2. – P. 369-372.
13. Ho Do Y., Sik Kwak J. et al. Oxygen ion drifted bipolar resistive switching behaviors in TiO₂-Al electrode interfaces // *Thin Solid Films*. – 2010. – Vol. 518. – P. 4408-4411.
14. Ho Do Y., Sik Kwak J. et al. TiN electrode-induced bipolar resistive switching of TiO₂ thin films // *Current Applied Physics*. – 2010. – Vol. 10. – P. 71-74.
15. Freitas R. F., Wilcke W. W. Storage-class memory: The next storage system technology // *IBM J. Res. & Dev.* – 2008. – Vol.52. – № 4-5. – P. 439-447.
16. Mähne H., Slesazek S. et al. The influence of crystallinity on the resistive switching behavior of TiO₂ // *Microelectronic Engineering*. – 2011. – Vol. 88. – P. 1148-1151.
17. Chen S., Wu J. Unipolar resistive switching behavior of BiFeO₃ thin films prepared by chemical solution deposition // *Thin Solid Films*. – 2010. – Vol. 519. – P. 499-504.
18. Shuai Y., Zhou S. et al. Nonvolatile bipolar resistive switching in Au/BiFeO₃/Pt // *J. Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 109. – 124117.
19. Chen S.-C., Chang T.-C. et al. Bipolar resistive switching of chromium oxide for resistive random access memory // *Solid State Electronics*. – 2011. – Vol. 62. – Is. 1. – P. 40-43.
20. Shahar Kvatinsky, Eby G. Friedman, Avinoam Kolodn, and Uri C. Weiser TEAM: Threshold Adaptive Memristor Model // *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: regular papers*. – 2013 – V. 60. - N. 1. – P.211-221.
21. Kalinin Yu.E., Remizov A.N., Sitnikov A.V., Samtcova N.P. Struktura i elektricheskiye svoystva amorfnykh nanokompozitov (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(SiO₂)_{100-x} [The structure and electrical properties of amorphous nanocomposite (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(SiO₂)_{100-x}] // *Perspektivnyye materialy*. – 2003. – № 3. – P. 62-66.
22. Yang J.J., Strukov D.B., and Stewart D.R. Memristive devices for computing // *Nature Nanotechnology*. – 2013. – V. 8. – P. 13-24.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОВАНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ МАТРИЦ

М.В. Козлов, С.В. Шешенин, А.В. Бабкин, А.В. Кепман, А.М. Кудрин

В работе рассмотрены основные причины появления коробления и остаточных напряжений в изделиях из полимерных композиционных материалов (ПКМ), возникающих в процессе их изготовления. Проведен сравнительный анализ математических моделей отверждения, известных в литературе. Основные принципы, лежащие в основе рассматриваемых моделей, дополнены предположениями о начале учета деформаций немеханической природы с момента гелирования связующего, а также механическом контакте между изделием и оснасткой, меняющем свое состояние в процессе решения. На основе математической модели создан программный модуль для системы конечно-элементного анализа, позволяющий решить термомеханическую задачу отверждения и получить искаженную форму изделия по окончании процесса формования. Проведено численное моделирование процесса производства образцов П-образной формы с использованием двух наиболее распространенных в литературе определяющих соотношений. На примере одного из образцов продемонстрирована эволюция температурного поля и степени полимеризации в процессе изготовления. Установлена и объяснена разница в величинах угловых отклонений, получаемых в расчете по двум рассматриваемым моделям

Ключевые слова: композит, отверждение, искажение формы, коробление

Введение

Остаточные напряжения, возникающие в процессе производства композиционных материалов с термореактивной матрицей, напрямую влияют на качество готового изделия и создают проблемы, как в процессе изготовления изделия, так и его дальнейшей эксплуатации. Одним из основных факторов, приводящих к возникновению остаточных напряжений и искажению формы конструкции из композита, является термическая усадка, которая возникает, когда материал охлаждают от температуры формования до комнатной температуры. Другим фактором является химическая усадка термореактивной матрицы, происходящая при превращении смолы из вязкой жидкости в твердый материал.

В литературе описано большое количество попыток расчета коробления конструкций из композиционных материалов. В библиографическом обзоре статей за период с 1985 по 2003 год [1], посвященных конечно-элементному анализу при моделировании процесса производства композиционных материалов и оценке приобретаемых ими механических свойств, самая ранняя публикация на рассматриваемую тему датируется 1989 годом.

Козлов Михаил Владимирович – МГУ имени М.В. Ломоносова, аспирант, e-mail: my_skyline@mail.ru
Шешенин Сергей Владимирович – МГУ имени М.В. Ломоносова, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sheshenin@mech.math.msu.su
Бабкин Александр Владимирович – МГУ имени М.В. Ломоносова, младший научный сотрудник, e-mail: Alexandr.Babkin@gmail.com
Кепман Алексей Валерьевич – МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: alexkep@mail.ru
Кудрин Алексей Михайлович – НВЛ «Композиционные материалы» НОЦ «ИТА» ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, тел. 8(951)5569251

Целью данной работы является проведение численных расчетов искажения формы образцов с простой геометрией с целью сравнения наиболее распространенных механических моделей отверждения.

Математические модели

Описание моделей отверждения, приведенное ниже, взято авторами настоящей статьи из их предыдущей работы [2]. Процесс отверждения композита в каждой точке среды характеризуется монотонно возрастающей функцией $X(t) : 0 \leq X(t) \leq 1$ называемой степенью полимеризации связующего в данный момент времени. Значение $X = 0$ соответствует неполимеризованному связующему, а значение $X = 1$ — полностью полимеризованному. Зависимость $X(t)$ является решением дифференциального уравнения вида

$$\frac{dX}{dt} = f(X, T(t)), \quad (1)$$

называемого уравнением кинетики полимеризации. В нем через T обозначена температура в рассматриваемой точке пространства в текущий момент времени, а через t — время от начала процесса отверждения. Соотношение (1) может быть выбрано в виде уравнения Аррениуса

$$\frac{dX}{dt} = A e^{-\frac{E}{RT}} f(X), \quad (2)$$

где A и E — параметры, R — универсальная газовая постоянная, а $f(X)$ — функция, определяемая экспериментально.

Распределение температур в сплошной среде находится из решения уравнения теплопроводности

$$\rho \frac{\partial(cT)}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{q} + q, \quad (3)$$

где ρ — плотность, c — удельная теплоемкость материала, q — удельная мощность тепловыделения. Вектор потока тепла \bar{q} связан с градиентом температуры законом Фурье

$$q_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (4)$$

в правую часть выражения, для которого входят компоненты тензора теплопроводности k_{ij} .

Вследствие протекания химической реакции в процессе отверждения в связующем происходит выработка тепла, пропорциональная скорости реакции полимеризации. Для чистого связующего удельная мощность выделения тепла определяется соотношением

$$q = \rho_m H_{\text{tot}} \frac{dX}{dt}, \quad (5)$$

где ρ_m — плотность связующего, а H_{tot} — удельная теплота, выделяющаяся при полной полимеризации. Для осредненного материала принято считать

$$q = V_m \rho_m H_{\text{tot}} \frac{dX}{dt}, \quad (6)$$

где V_m — объемная доля связующего.

Механические деформации ε_{ij}^M равны разности полных деформаций ε_{ij} и деформаций немеханической природы ξ_{ij} :

$$\varepsilon_{ij}^M = \varepsilon_{ij} - \xi_{ij}. \quad (7)$$

Для нахождения полных деформаций используются соотношения Коши:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (8)$$

Деформации немеханической природы складываются из деформаций теплового расширения ξ_{ij}^T и химической усадки ξ_{ij}^C :

$$\xi_{ij} = \xi_{ij}^T + \xi_{ij}^C. \quad (9)$$

Необходимостью учета истории процесса полимеризации объясняется интегральный вид соотношений для их нахождения

$$\xi_{ij}^T = \int_{t_{gel}}^t \alpha_{ij}(T(t'), X(t')) \frac{\partial T}{\partial t'} dt', \quad (10)$$

$$\xi_{ij}^C = \int_{t_{gel}}^t \beta_{ij}(X(t')) \frac{\partial X}{\partial t'} dt'. \quad (11)$$

Отличительной особенностью предлагаемой модели является учет немеханических деформаций с момента гелирования связующего t_{gel} , что соответствует технологии вакуумного формования при производстве композита. В данном случае связующее считается жидким и способным протекать между волокнами до начала гелирования, при этом его усадка не сопровождается появлением напряжений в композите.

В соотношения для нахождения немеханических деформаций входят коэффициенты теплового расширения материала α_{ij} и коэффициенты химической усадки материала β_{ij} , зависящие от температуры и степени полимеризации. Для конкретизации этой зависимости в данной работе используется следующие соотношения:

$$\alpha_{ij}(X, T) = \begin{cases} \alpha_{ij}^R, & X \geq X_{gel}, T > T_g(X) \\ \alpha_{ij}^G, & X \geq X_{gel}, T \leq T_g(X) \end{cases}, \quad (12)$$

$$\beta_{ij}(X, T) = \begin{cases} \beta_{ij}^R, & X \geq X_{gel}, T > T_g(X) \\ \beta_{ij}^G, & X \geq X_{gel}, T \leq T_g(X) \end{cases}. \quad (13)$$

Здесь индексами R и G обозначены постоянные коэффициенты теплового расширения и химической усадки, соответствующие резиноподобному (R) и стеклообразному (G) состояниям. Величина X_{gel} равна такой степени полимеризации, при которой происходит гелирование связующего, то есть существенное повышение его вязкости. Зависимость температуры стеклования T_g от степени полимеризации может быть задана как явно, так и аппроксимирована любым подходящим образом. В частности, для этих целей может быть использована гипербола, построенная по двум характерным значениям и параметру λ , определяющему ее вид [3]:

$$\frac{T_g - T_g^0}{T_g^1 - T_g^0} = \frac{\lambda X}{1 - (1 - \lambda)X}, \quad (14)$$

где T_g^0 — температура стеклования неполимеризованного связующего, T_g^1 — аналогичный параметр для полностью полимеризовавшейся матрицы.

Определяющие соотношения упругой модели, в которой компоненты тензора модулей упругости кусочно-постоянны, записываются в виде

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} C_{ijkl}^R \varepsilon_{kl}^M, & T \geq T_g(X) \\ C_{ijkl}^G \varepsilon_{kl}^M, & T < T_g(X) \end{cases}, \quad (15)$$

где C_{ijkl}^R и C_{ijkl}^G — компоненты тензора модулей упругости в резиноподобном и стеклообразном состояниях соответственно.

Модель с кусочно-линейными модулями, называемая также CHILE (сокращение от CureHardeningInstantaneousLinearElastic), предполагает, что в окрестности температуры стеклования упругие модули изменяются линейно, в то время как в полностью резиноподобном и стеклообразном состояниях они постоянны [4–6]. В названных работах приведены соотношения для модуля Юнга связующего, которые легко обобщаются на весь тензор модулей упругости. Полученные определяющие соотношения имеют вид

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(X, T) \varepsilon_{kl}^M, \quad (16)$$

где

$$C_{ijkl}(X, T) = C_{ijkl}^R, \text{ если } T > T_g(X) + T_R; \quad (17)$$

$$C_{ijkl}(X, T) = C_{ijkl}^R + \frac{T_g(X) + T_R - T}{T_R - T_L} (C_{ijkl}^G - C_{ijkl}^R), \quad (18)$$

$$\text{если } T_g(X) + T_L \leq T \leq T_g(X) + T_R;$$

$$C_{ijkl}(X, T) = C_{ijkl}^G, \text{ если } T < T_g(X) + T_L. \quad (19)$$

Здесь константы T_L и T_R являются параметрами материала, количественно характеризующими вид наклонной области в аппроксимации зависимости модуля упругости связующего от температуры.

Определяющие соотношения вязкоупругой модели [7–9] записываются в виде

$$\sigma_{ij} = \int_0^t R_{ijkl}(t - \tau, X, T) d\varepsilon_{kl}(\tau), \quad (20)$$

где R_{ijkl} — компоненты тензора функций релаксации, зависящие от времени, степени полимеризации и температуры, t — время с момента начала процесса полимеризации.

Модель Сванберга [10] является своеобразным компромиссом между упругой и вязкоупругой моделями. Ее определяющие соотношения имеют вид:

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} C_{ijkl}^R \varepsilon_{kl}^M, & T \geq T_g(X) \\ C_{ijkl}^G (\varepsilon_{kl}^M - \varepsilon_{kl}^M(t_{tr})) + \sigma_{ij}(t_{tr}), & T < T_g(X) \end{cases}, \quad (21)$$

где через t_{tr} обозначено время последнего перехода из резиноподобного в стеклообразное состояние. Приведенные соотношения означают, что приращение напряжений, полученное материалом в стеклообразном состоянии, исчезает при расстекловывании. Поэтому в области резиноподобного состояния $T \geq T_g(X)$ имеет место закон упругости независимо от того, каким путем попасть в эту область. При новом стекловании напряжения, соответствующие твердому состоянию, начнут накапливаться заново. Таким образом, упрощенно учитывается зависимость от истории процесса отверждения и деформирования.

Картины аппроксимации свойств связующего в моделях CHILE и Сванберга, а также способ определения параметров материала T_L и T_R показаны на рис. 1.

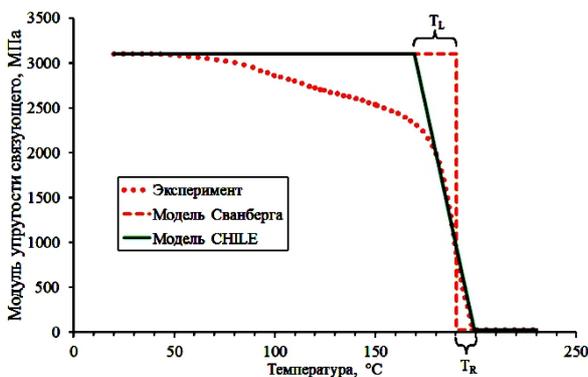


Рис. 1. Аппроксимация зависимости модуля упругости связующего от температуры в различных моделях и способ определения параметров материала

Предлагаемая модель процесса формирования композита наряду с явлениями, происходящими в изделии, рассматривает термомеханическое поведение оснастки и ее взаимодействие с изделием в процессе отверждения. Отличительной особенностью работы [2] явилось предположение о том, что до момента гелирования изделие может без трения проскальзывать по оснастке, а после этого момента — прилипает без возможности самостоятельного отделения. Те же контактные предположения приняты и в рамках настоящей модели. Между изделием и оснасткой в процессе отверждения также вводится тепловой контакт.

Для задач отверждения, как правило, используется квазистатическая постановка с уравнениями равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0. \quad (22)$$

Граничными условиями являются поля перемещений и напряжений на поверхности тела, а также поля температур и потоков тепла. Начальные условия — это распределения температур и степеней полимеризации в рассматриваемом теле в начальный момент времени.

Свойства материала

В табл. 1 и табл. 2 приводятся свойства слоя углеткани, необходимые для решения тепловой и механической задач соответственно. Материальные параметры были найдены как из собственных экспериментов, так и с помощью подходов осреднения [4,6]. Для используемого в работе связующего уравнение кинетики полимеризации было взято в виде уравнения Праута-Томпкина n -го порядка с автокатализом

$$\frac{dX}{dt} = A e^{-\frac{E}{RT}} (1-X)^n X^a, \quad (23)$$

где A, E, n, a — параметры, R — универсальная газовая постоянная.

Таблица 1
Свойства материала слоя для тепловой задачи

Обозначение	Величина	Единицы
V_m	0,43	—
H_{tot}	480	кДж/кг
ρ_m	1,17	г/см ³
A	708	1/с
E	64	кДж/моль
R	8,31	Дж/(моль К)
n	0,93	—
a	0,68	—
k_{11}	2,69	Вт/(м К)
k_{22}	2,69	Вт/(м К)
k_{33}	0,52	Вт/(м К)
ρ	1,51	г/см ³
C_p	881	Дж/(кг К)

Таблица 2

Свойства материала слоя для механической задачи

Обозначение	Величина	Единицы
E_1^R, E_2^R	58,7	ГПа
E_3^R	0,12	ГПа
G_{12}^R	0,03	ГПа
G_{23}^R, G_{13}^R	0,04	ГПа
ν_{12}^R	0	—
ν_{23}^R, ν_{13}^R	0,49	—
E_1^G, E_2^G	65	ГПа
E_3^G	13	ГПа
G_{12}^G	4,5	ГПа
G_{23}^G, G_{13}^G	5	ГПа
ν_{12}^G	0,03	—
ν_{23}^G, ν_{13}^G	0,3	—
$\alpha_{11}^R, \alpha_{22}^R$	$-7,63 \cdot 10^{-8}$	1/К
α_{33}^R	$1,53 \cdot 10^{-4}$	1/К
$\alpha_{11}^G, \alpha_{22}^G$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	1/К
α_{33}^G	$7,2 \cdot 10^{-5}$	1/К
$\beta_{11}^R, \beta_{22}^R$	$-2,93 \cdot 10^{-6}$	—
β_{33}^R	$-8,9 \cdot 10^{-3}$	—
$\beta_{11}^G, \beta_{22}^G$	$-3,14 \cdot 10^{-4}$	—
β_{33}^G	$-8,9 \cdot 10^{-3}$	—
T_g^0	-11	°С
T_g^1	210	°С
λ	0,48	—
T_L	-21	К
T_R	9	К

Численное моделирование

Решаемая задача является несвязанной. Это значит, что механическое деформирование конструкции не влияет на происходящие в ней процессы теплопереноса. Следовательно, поле температур в расчетной области можно найти отдельно, после чего решить механическую задачу. Уравнения, входящие в построенную модель, были реализованы в виде собственного программного модуля для системы конечно-элементного анализа, позволяющего рассчитать конечную форму изделия, изготовленного из композита с термореактивной матрицей.

Для численного моделирования были выбраны образцы П-образной формы, изготавливаемые на алюминиевой оснастке. Образец №1 предполагался выполненным из 50 слоев углеткани, в то время как образец №2 состоял из 16 слоев. В состав конечно-элементных моделей для механического расчета (рис. 2а) входят тела оснастки и изделий с учетом обрезки технологических припусков. В модели для теплового расчета (рис. 2б), помимо оснастки и

изделий, входят блоки из пеностекла, заполняющего внутреннее пространство оснасток, а также накладки из силиконовой резины, которые обеспечивают равномерное прижатие преформы на этапе изготовления.

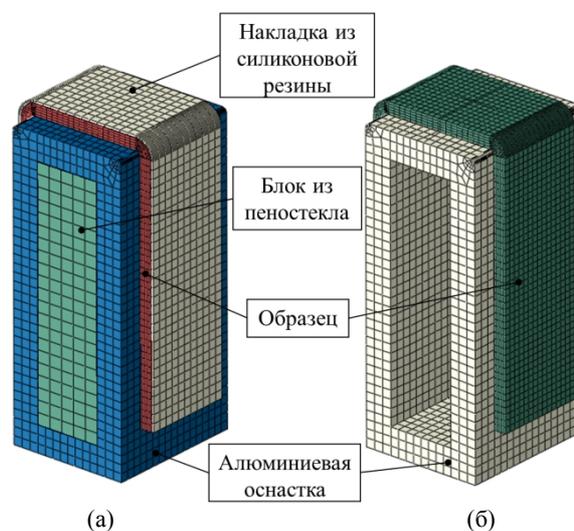


Рис. 2. Модели образца на алюминиевой оснастке для теплового (а) и механического (б) расчетов

Решение тепловой задачи производилось с момента окончания пропитки, происшедшей при температуре 100 °С. Конструкция подвергалась нагреву до температуры 180 °С со скоростью 2°С/мин, после чего выдерживалась при температуре формования 3 часа. В табл. 3 приведен используемый цикл отверждения. Моделирование нахождения изделия в печи осуществлялось заданием условий конвекции на суммарной свободной поверхности системы изделие-оснастка. Между оснасткой и изделием рассматривался идеальный тепловой контакт.

Таблица 3

Зависимость температуры воздуха в печи от времени с момента окончания пропитки

Время, мин	Температура воздуха, °С
0	100
40	180
220	180
300	26

Решение механической задачи производилось с момента включения печи. Для того чтобы учесть деформации оснастки за время нагрева до температуры пропитки, на первом шаге решения всей системе было задано приращение температуры, равное разнице температуры пропитки и комнатной температуры. Уже после этого поле температур, необходимое для расчета немеханических деформаций, бралось из решения тепловой задачи. На поверхности контакта изделия и оснастки применялось два типа граничных условий. Предполагалось, что до момента гелирования связующего изделие может без трения

проскальзывать по оснастке, а после этого момента прилипает без возможности самостоятельного отделения. После завершения охлаждения до комнатной температуры происходило разделение изделия и оснастки путем удаления из конечно-элементной модели тела оснастки. Накопленные в изделии напряжения в этот момент высвобождались, вызывая искажения его формы.

Результаты анализа

Результаты моделирования подробно изложены на примере образца из 50 слоев. На рис. 3 показаны распределения температур в конструкции во время ключевых стадий процесса формования. Пеностекло обладает малой теплопроводностью, что приводит к существенным перепадам температуры в нем во время процессов нагрева и охлаждения (рис. 3а, рис. 3в). Во время активной фазы полимеризации в композите происходит выделение тепла, что приводит к его локальному перегреву (рис. 3б).

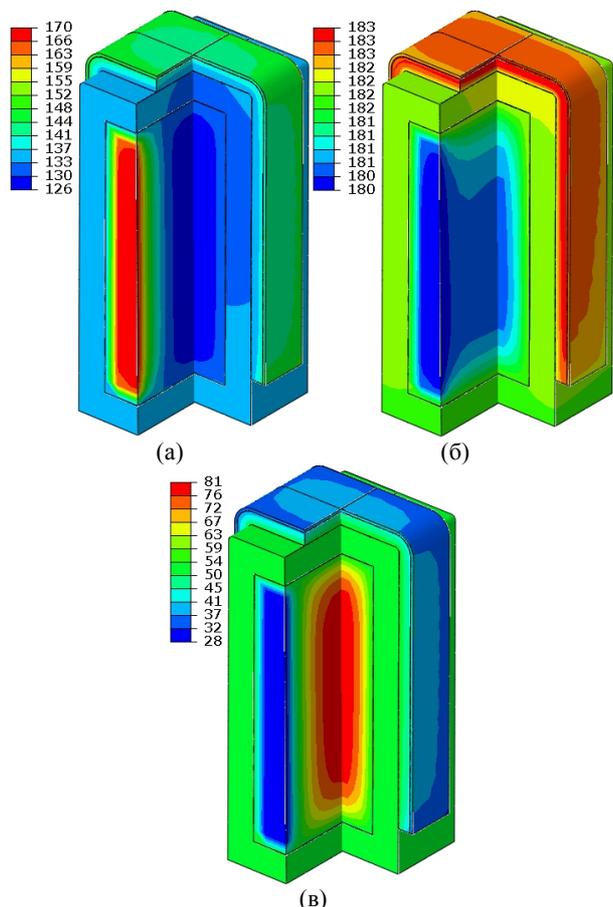


Рис. 3. Распределение температур в конструкции (°C) во время нагрева (а), активной фазы полимеризации связующего (б) и охлаждения (в)

Картины распределения степени полимеризации в изделии в различные моменты времени показаны на рис. 4. Полная полимеризация связующего наступила после выдержки в течение 3 ч при температуре формования.

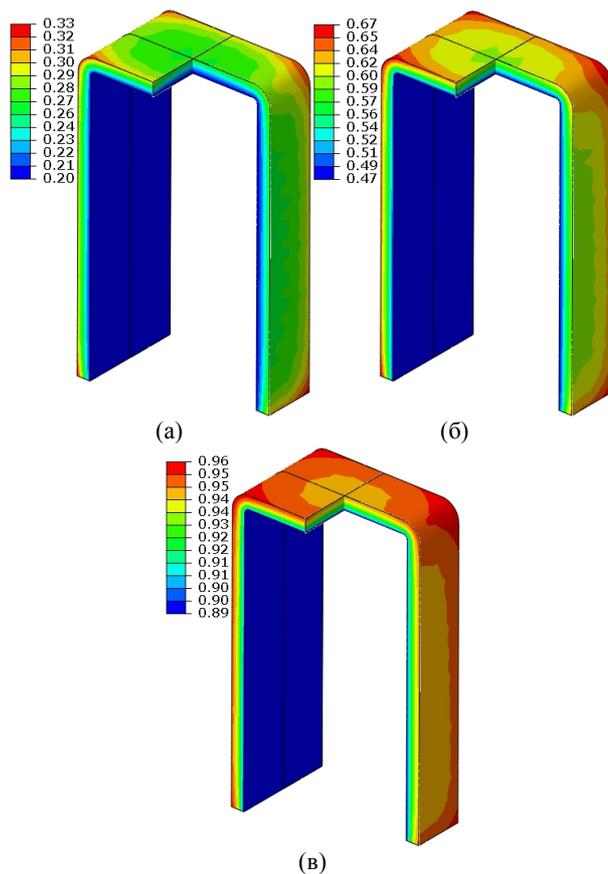


Рис. 4. Распределение степени полимеризации в изделии: (а) – выдержка 1ч 15 мин при температуре формования, (б) – выдержка 1ч 45 мин при температуре формования, (в) – выдержка 2ч 25 мин при температуре формования

На приведенных картинах заметно, что полимеризация протекает быстрее в углах изделия в силу их более интенсивного прогрева во время нахождения в печи. Распределение степени полимеризации по толщине детали говорит о более медленном протекании реакции в слоях, примыкающих к оснастке, по сравнению со свободной стороной изделия.

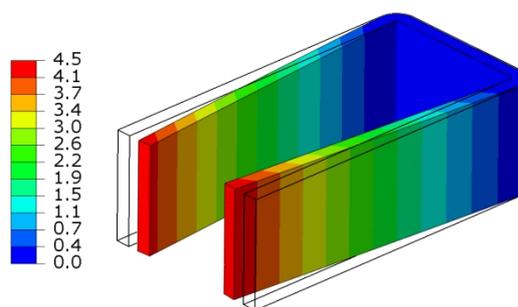


Рис. 5. Качественная картина искажения формы образца и величины перемещений (мм)

После снятия с оснастки происходит коробление изделия, которое выражается в уменьшении его изначально прямых углов. Качественный вид искаженной формы образца, а также перемещения его стенок, полученные в результате расчета коробления, показаны на рис. 5.

В ходе численного моделирования также были измерены параметры, характеризующие коробление образцов. Вычисленные значения угловых отклонений занесены в табл. 4.

Таблица 4
Угловые отклонения, °

Номер образца	Число слоев	Расчет по модели	
		Сванберга	CHILE
1	50	1,195	1,415
2	16	1,323	1,398

По результатам моделирования видна закономерность, согласно которой отклонения, возникающие в расчетах по модели Сванберга, имеют меньшую величину, чем отклонения, получаемые по модели CHILE. Так, изменения углов, вычисленные по модели Сванберга, оказались, в среднем, на 12 % меньше, чем в модели CHILE. Разница в величинах искажения формы в этих моделях объясняется различным уровнем напряжений в изделии, полученных к моменту снятия с оснастки. Главной причиной этого является механизм накопления напряжений, заложенный в модель Сванберга. Согласно нему напряжения, набранные композитом в резиноподобном состоянии, «замораживаются» при застекловывании (21). В свою очередь, напряжения, получаемые в стеклообразном состоянии, являются следствием механических деформаций, приобретенных уже после стеклования. В модели CHILE такое разделение отсутствует, и напряжения возникают от суммарных механических деформаций, полученных с начала решения задачи.

Заключение

В работе проведено теоретическое сравнение известных в литературе моделей отверждения композита с термореактивным связующим. Существующие на данный момент идеи обобщены для возможности описания процесса отверждения композита с учетом оснастки. Научной новизной предлагаемой модели являются улучшения, к которым относится начало учета деформаций немеханической природы с момента гелирования связующего, а также механический контакт между изделием и оснасткой, который меняет свое состояние в процессе решения.

Уравнения, входящие в построенную модель, реализованы в виде собственного программного модуля для системы конечно-элементного анализа, позволяющего рассчитать конечную форму изделия, изготовленного из композита с термореактивной матрицей. Произведено численное моделирование отверждения экспериментальных образцов, отличительными особенностями которого являются разделение задачи на тепловую и механическую составляющие, полноценный учет оснастки на всех этапах формирования изделий, отслеживание механических процессов с момента включения печи

и теплхимических процессов с момента окончания пропитки, происшедшей при повышенной температуре.

На примере одного из моделируемых образцов продемонстрирована эволюция температурного поля и степени полимеризации изделия в процессе отверждения. Угловые отклонения, полученные в расчете по модели Сванберга, оказались, в среднем, на 12 % меньше, чем в модели CHILE, что объясняется различиями в механизме накопления напряжений в рассматриваемых моделях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0114 от 14 августа 2014 г. в составе мероприятий по реализации Постановления Правительства РФ № 218, шифр 2014-218-05-8228).

Литература

1. Mackerle, J. Finite element analyses and simulations of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985–2003) [Text] / J. Mackerle // Computational Materials Science. – 2004. – vol. 31. – pp. 187-219.
2. Моделирование влияния оснастки на конечную форму изделий из полимерного композита [Текст] / М.В. Козлов, С.В. Шешенин, И.В. Макаренко, Д.А. Белов // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2016. – Т. 9, № 2. – С. 145-161.
3. Prasatya, P. A viscoelastic model for predicting isotropic residual stresses in thermosetting materials: effects of processing parameters [Text] / P. Prasatya, G.B. McKenna, S.L. Simon // J. Compos. Mater. – 2001. – vol. 35. – no. 10. – pp. 826-848.
4. Bogetti, T.A. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates [Text] / T.A. Bogetti, J.W. Gillespie Jr. // J. Compos. Mater. – 1992. – vol. 26. – no. 5. – pp. 626-660.
5. Johnston, A. A plane strain model for process-induced deformation of laminated composite structures [Text] / A. Johnston, R. Vaziri, A. Poursartip // J. Compos. Mater. – 2001. – vol. 35. – no. 16. – pp. 1435-1469.
6. Zobeiry, N. Viscoelastic constitutive models for evaluation of residual stresses in thermoset composites during cure [Text] / N. Zobeiry / PhD Dissertation. – Vancouver: The University of British Columbia, 2006. – 276 p.
7. White, S.R. Process-induced residual stress analysis of AS4/3501-6 composite material [Text] / S.R. White, Y.K. Kim // Mech. Compos. Mater. St. – 1998. – vol. 5. – no. 2. – pp. 153-186.
8. Clifford, S. Thermoviscoelastic anisotropic analysis of process induced residual stresses and dimensional stability in real polymer matrix composite components [Text] / S. Clifford, N. Jansson, W. Yu, V. Michaud, J.-A. Manson // Compos. Part A-Appl. S. – 2006. – vol. 37. – no. 4. – pp. 538-545.
9. Jun, L. Thermo-viscoelastic analysis of the integrated T-shaped composite structures [Text] / L. Jun, Y.X. Feng, L.Y. Hua, C.Z. Zhi, K.Z. Jun, H.X. Cai, D. Di // Compos. Sci. Technol. – 2010. – vol. 70. – no. 10. – pp. 1497-1503.
10. Svanberg, J.M. Predictions of manufacturing induced shape distortions – high performance thermoset composites [Text] / J.M. Svanberg / PhD Dissertation. – Lulea: Lulea University of Technology, 2002. – 131 p.

MODELING OF FORMING OF COMPOSITES BASED ON THERMOSETTING MATRICES

M.V. Kozlov, Ph.D. student, Department of Mechanics of Composite Materials, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, e-mail: my_skyline@mail.ru

S.V. Sheshenin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Deputy Head of Department of Mechanics of Composite Materials, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, e-mail: sheshenin@mech.math.msu.su

A.V. Babkin, Junior Researcher, Department of Chemical Technology and New Materials, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, e-mail: Alexandr.Babkin@gmail.com

A.V. Kepman, Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Department of Chemical Technology and New Materials, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, e-mail: alexkep@mail.ru

A.M. Kudrin, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kudrin.ru@gmail.com

The paper discusses the main causes of warpage and residual stresses in structural parts made of polymeric composite materials that occur during the manufacturing process. A comparative analysis of known mathematical models for the curing process is presented in the paper. The basic principles underlying the models under consideration are supplemented by assumptions about the beginning of accounting for non-mechanical deformations from the moment of the gelation of the binder, as well as about a mechanical contact between the part and the tooling, that changes its state in the solution process. On the basis of the mathematical model, a user code for a finite-element analysis system was developed. It allows to solve the thermomechanical problem and get the distorted shape of the product at the end of the forming process. Numerical simulations of the curing processes were conducted for a number of U-shape samples using the two most known constitutive relations. As an example, the evolution of the temperature field and the degree of cure during the manufacturing process are given for one of the samples. The difference in the magnitude of the angular deviation obtained on the basis of two models under consideration was explained

Key words: composite, hardening, shape distortion, warpage

References

1. Mackerle J. Finite element analyses and simulations of manufacturing processes of composites and their mechanical properties: a bibliography (1985–2003) // *Computational Materials Science*. – 2004. – vol. 31. – pp. 187-219.
2. Kozlov M.V., Sheshenin S.V., Makarenko I.V. Belov D.A. Modeling the influence of tooling on the final shape of polymer composite parts // *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2016, vol. 9. – no. 2, pp. 145-161.
3. Prasatya P., McKenna G.B., Simon S.L. A viscoelastic model for predicting isotropic residual stresses in thermosetting materials: effects of processing parameters // *J. Compos. Mater.* – 2001. – vol. 35. – no. 10. – pp. 826-848.
4. Bogetti T.A., Gillespie J.W., Jr. Process-induced stress and deformation in thick-section thermoset composite laminates // *J. Compos. Mater.* – 1992. – vol. 26. – no. 5. – pp. 626-660.
5. Johnston A., Vaziri R., Poursartip A. A plane strain model for process-induced deformation of laminated composite structures // *J. Compos. Mater.* – 2001. – vol. 35. – no. 16. – pp. 1435-1469.
6. Zobeiry N. Viscoelastic constitutive models for evaluation of residual stresses in thermoset composites during cure / PhD Dissertation. – Vancouver: The University of British Columbia, 2006. – 276 p.
7. White S.R., Kim Y.K. Process-induced residual stress analysis of AS4/3501-6 composite material // *Mech. Compos. Mater. St.* – 1998. – vol. 5. – no. 2. – pp. 153-186.
8. Clifford S., Jansson N., Yu W., Michaud V., Manson J.-A. Thermoviscoelastic anisotropic analysis of process induced residual stresses and dimensional stability in real polymer matrix composite components // *Compos. Part A- Appl. S.* – 2006. – vol. 37. – no. 4. – pp. 538-545.
9. Jun L., Feng Y.X., Hua L.Y., Zhi C.Z., Jun K.Z., Cai H.X., Di D. Thermo-viscoelastic analysis of the integrated T-shaped composite structures // *Compos. Sci. Technol.* – 2010. – vol. 70. – no. 10. – pp. 1497-1503.
10. Svanberg J.M. Predictions of manufacturing induced shape distortions – high performance thermoset composites / PhD Dissertation. – Lulea: Lulea University of Technology, 2002. – 131 p.

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР Mg/NbO

О.В. Стогней, А.В. Ситников, А.Н. Смирнов, К.И. Семенов, В.В. Черниченко

Методом ионно-лучевого распыления оксидной (Nb-O) и металлической (Mg) мишеней и последующим осаждением материала на подложки, вращающиеся вокруг мишеней, получены тонкие пленки магния, оксида ниобия, а также пленки многослойной наноструктуры $(Mg/NbO)_{82}$, содержащей 82 бислоя $(Mg+NbO)$. На основе результатов, полученных с помощью малоугловой рентгеновской рефлектометрии, а также рентгеновской дифрактометрии показано, что при напылении пленок магния в них формируется слоистая структура, в которой слои магния разделены оксидом магния, формирующимся за то время, когда подложка находится вне потока конденсирующихся атомов. Структура напыленных пленок магния кристаллическая с явно выраженной текстурой, структура пленок оксида ниобия аморфная и однородная. С использованием V-образного экрана получены многослойные наноструктуры $(Mg/NbO)_{82}$ с изменяющейся толщиной прослойки магния. Исследована зависимость сопротивления многослойной структуры от номинальной толщины бислоя, меняющейся в интервале значений 2.2 – 6.2 нм. Предполагается наличие электрического перколяционного перехода в многослойной системе при увеличении толщины бислоя

Ключевые слова: ионно-лучевое напыление, малоугловая рентгеновская рефлектометрия, многослойная наноструктура, механизм электропереноса

Введение

Хранение водорода в виде твердотельных гидридов считается одним из наиболее удобных и безопасных методов хранения, благодаря способности ряда металлов обратимо поглощать значительные количества водорода. Система «металл-водород» обладает уникальным сочетанием свойств, включая возможность достижения высоких объемных плотностей атомов водорода в металле, широкий диапазон рабочих давлений и температур, селективность процессов поглощения/выделения и ряд других особенностей [1]. В последнее время вырос интерес к наноструктурным и нанокompозитным материалам в качестве сред для хранения водорода поскольку наноразмерность металлической фазы может обеспечить значительное увеличение площади реакционной поверхности, а также значительно повысить химическую активность поверхности, что способствует ускорению процессов адсорбции водорода [2]. В этом контексте перспективной системой считается наноструктурированный материал на основе магния (в качестве гидридообразующего компонента) и оксида ниобия (в качестве каталитического компонента) [3,4]. Однако эту перспективную систему чрезвычайно сложно получить вследствие высокой химической активности магния и более высокой склонности к окислению по сравнению с ниобием. В данной работе рассмотрена возможность получения наноструктурированной системы, содержащей металлический магний в объеме оксида ниобия.

Образцы и методика эксперимента

Получение многослойных структур металл-диэлектрик осуществлялось методом ионно-плазменного распыления двух мишеней (металлической и диэлектрической) с последующим осаждением материала на подложки, совершающие круговое движение вокруг мишеней со скоростью 0,18 об./мин. Распыление мишеней проводилось в среде аргона с рабочим давлением $7 \cdot 10^{-4}$ Торр. Схема распылительной камеры представлена на рис. 1.

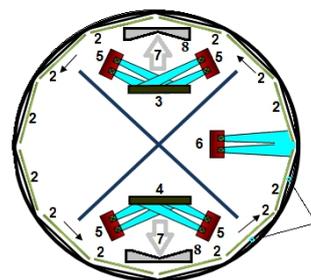


Рис. 1. Схема распылительной камеры (вид сверху).

- 1 - вращающееся основание держателей подложек;
- 2 - подложкодержатели; 3 - мишень из Nb_2O_5 ; 4 - мишень из Mg; 5 - ионные источники распыляющие мишени;
- 6 - ионный источник для очистки подложек; 7 - поток атомов, конденсирующихся на подложку, 8 - V - образный экран

Напыление осуществлялось на подложки трех типов: монокристаллические пластины кремния, пьезоэлектрическое стекло и ситалловые полоски. Образцы на кремниевых подложках использовались для рентгеновской рефлектометрии, образцы, нанесенные на стекло, предназначались для стандартной рентгеновской дифракции, образцы на ситалле служили для резистивных исследований. Структурные исследования проводились на рентгеновском дифрактометре D2 Phazer в геометрии Брегга-Брентано, в

Стогней Олег Владимирович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sto@sci.vrn.ru
 Ситников Александр Викторович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sitnikov04@mail.ru
 Смирнов Андрей Николаевич – ВГТУ, магистрант, e-mail: deadpunk@mail.ru
 Семенов Константин Иванович – ВГТУ, аспирант, e-mail: konst1990i@yandex.ru
 Черниченко Владимир Викторович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vlad1427@yandex.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-02-05920).

излучении с длиной волны $\lambda=1,541$ А. Электрическое сопротивление многослойных образцов измерялось потенциометрическим методом по двухзондовой схеме при протекании тока вдоль сформированных слоев. Электрические контакты создавались на внешней (верхней) поверхности многослойной структуры.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Перед напылением многослойной структуры проводились напыления отдельных компонент (то есть чистого оксида ниобия и чистого магния) на подложки, расположенные на вращающемся подложкодержателе (поз. 2, рис. 1). Это делалось для определения номинальной толщины слоя каждого материала, формируемого за один оборот подложкодержателя. В дальнейшем это позволяет оценивать толщины бислоев при получении многослойной структуры. Осаждение материала на подложки происходило через V-образный экран (поз.8, рис 1), разделяющий мишень и подложкодержатель, что давало возможность в одном процессе напыления формировать пленки различной толщины. Подложки размещались на поверхности вертикального подложкодержателя имеющего высоту 280 мм. В зависимости от местоположения подложки на держателе плотность атомного потока (поз.7 на рис. 1), проходящего через V-образный экран, была различной, поэтому толщина напыляемого конденсата была разной. В верхней части подложки толщина пленки была минимальной, в нижней - максимальной. Оценка толщины полученных пленок магния и оксида ниобия проводилась на основе данных по рентгеновской рефлектометрии образцов, нанесенных на подложки из монокристаллического кремния.

На рис. 2 и 3 показаны результаты для пленок оксида ниобия и магния. Очевидно, что в зависимости от положения на подложкодержателе толщина пленки меняется, что находит свое отражение в изменении шага осцилляции и её амплитуды.

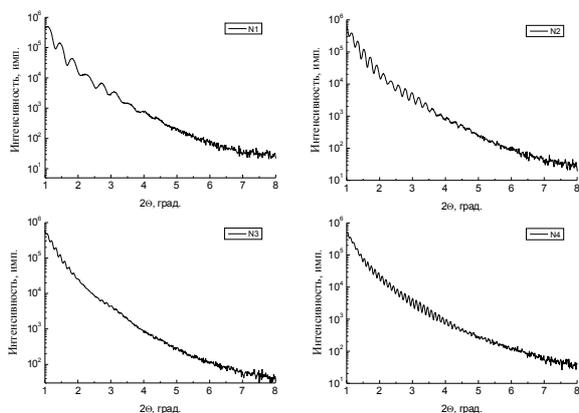


Рис. 2. Рентгеновская малоугловая рефлектометрия образцов тонкой пленки оксида ниобия, нанесенной на вращающуюся подложку через V-образный экран. Приведены рефлектограммы для пленок различной толщины

Численный расчет толщины пленок оксида ниобия осуществлялся на основе выражения (1), описы-

вающего двойное отражение рентгеновских лучей от двух поверхностей (верхней и нижней) тонкой пленки, находящейся на полубесконечной подложке [5]

$$h = \frac{\lambda}{2(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)}, \quad (1)$$

где h – толщина пленки, λ - длина волны рентгеновского излучения, θ_1 и θ_2 углы, соответствующие максимумам на осциллирующей зависимости. В данном случае рассматриваются два ближайших максимума. Рассчитанные значения толщин пленок в зависимости от положения на подложкодержателе приведены в таблице 1. Таким образом, за 68 оборотов происходит напыление оксидной пленки толщиной от 16 до 66 нм, в зависимости от положения подложки относительно V-образного экрана.

Полученные данные позволяют рассчитать распределение толщины слоев оксида ниобия при напылении многослойной системы на вращающуюся подложку. Разделив полученное значение толщины пленки на число полных оборотов подложкодержателя вокруг мишени, легко получить номинальную толщину слоя, формируемого в течение одного оборота подложкодержателя (то есть толщину одного слоя в многослойной структуре). Следует подчеркнуть, что это номинальная толщина, которая получена исходя из скорости напыления материала и она не означает, что за один оборот формируется сплошной слой материала оксида. Номинальная толщина одного слоя оксида ниобия в зависимости от положения подложки на подложкодержателе приведена в последнем столбце табл. 1. Аппроксимация полученных значений на всю длину подложкодержателя свидетельствует о том, что толщина одного слоя оксида ниобия варьируется в интервале значений 0,24 - 0,97 нм.

Таблица 1

Рассчитанные значения толщины пленок Nb-O в зависимости от положения на подложкодержателе и толщины слоя, наносимого за один оборот подложкодержателя

Образец Nb-O	Расстояние от края подложкодержателя, мм	Расщ. толщ. плёнки, h , нм	Число оборотов	Толщ. слоя, нм
№ 1	35	24	68	0,35
№ 2	100	45	68	0,66
№ 3	150	66	68	0,97
№ 4	223	65	68	0,96

Малоугловая рефлектометрия пленок магния даёт несколько иной результат. На рис. 3 приведены рентгенограммы трех образцов пленок магния, имеющих разную толщину (первый - наиболее тонкий, третий - наиболее толстый). Рефлектограмма от первого образца не обнаруживает максимумов интенсивности или регулярных осцилляций. Это свидетельствует о том, что в данном случае не произошло формирования сплошной пленки магния и образец представляет собой островковое покрытие. Рефлектограммы от образцов № 2 и № 3 подобны зависимостям, наблюдаемым при малоугловой ди-

фракции на многослойной структуре с толщиной бислоев, не превышающей нескольких нанометров [5, 6]. Считается, что в таких структурах дифракция происходит на межфазных границах, разделяющих соседние слои.

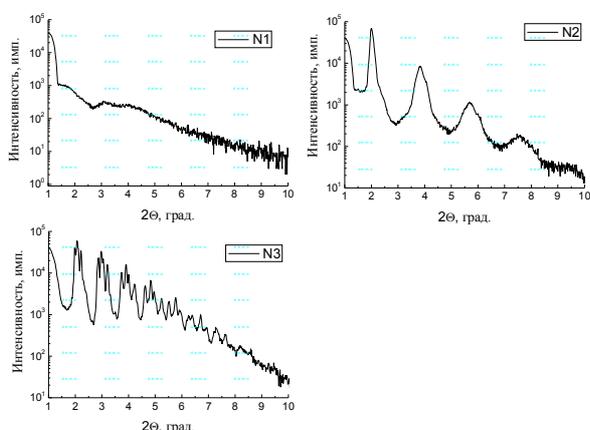


Рис. 3. Рентгеновская малоугловая рефлектометрия образцов тонкой пленки магния, нанесенной на вращающиеся подложки через V-образный экран. Приведены рефлектограммы для пленок различной толщины.

Полученный результат позволяет предположить, что при напылении магния на вращающиеся подложки происходит образование не гомогенного материала (как это происходило в случае с оксидом ниобия), а многослойной структуры. Обусловлено это тем, что при напылении на вращающиеся подложки фактическое осаждение материала происходит не в течение всего времени напыления, а лишь в течение того момента, когда подложки проходят мимо распыляемой мишени. В течение остального цикла вращения подложки, осаждения материала не происходит, поэтому поверхность пленки магния может окисляться кислородом, содержащимся в остаточном газе камеры, а также постоянно поступающим в неё в результате распыления оксидной мишени (Nb_2O_5). В следующий цикл прохождения подложки мимо мишени формируется слой магния, а за период движения подложки вне мишени поверхность напыленной плёнки вновь окисляется.

С учетом сделанного предположения зависимости, полученные для образцов магния №2 и №3 (рис. 3), использовались для оценки толщины полученных слоев. Расчет проводился на основе закона Вульфа-Брэгга

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (2)$$

где d - это толщина бислоя (магний + оксид магния), θ - угол, соответствующий максимуму на рефлектограмме, n - порядок максимума. Следует подчеркнуть, что выражение (2) корректно использовать для анализа многослойных структур в том случае, когда толщина слоев не превышает нескольких нанометров [5,7], в нашем случае это условие выполняется. В табл. 2 приведены рассчитанные толщины бислоя магния (магний + оксид магния).

Учитывая, что напыление магния осуществлялось на вращающиеся подложки, а также то, что число полных оборотов подложкодержателя было равно 85, суммарная толщина образца магния № 2 составила примерно 393 нм, а образца № 3 - 560 нм, что значительно больше, чем толщина пленки оксида ниобия (45 и 66 нм, соответственно). Это вполне объяснимо, поскольку коэффициент распыления магния в несколько раз больше, чем коэффициент распыления оксида ниобия [8,9]. Аппроксимация полученных значений для всей длины подложкодержателя показывает, что толщина слоя магния, формируемого за один проход подложек мимо распыляемой мишени, составляет от 2 до 7 нм в зависимости от положения подложки на подложкодержателе.

Таблица 2

Рассчитанные значения толщины пленок Mg в зависимости от положения на подложкодержателе

Образец Mg, №	Расстояние от края подложкодержателя, м	Порядок максимума, n	Расч. толщ. бислоя d , нм
1	35	-	-
2	100	1	4,5
2	100	2	4,3
2	100	3	4,6
2	100	4	4,7
3	150	1	5,0
3	150	2	5,9
3	150	3	6,7
3	150	4	6,6

Для изучения структурных особенностей чистых пленок, наносимых на вращающиеся подложки, проведена обычная рентгеновская дифракция образцов оксида ниобия и магния, напыленных на стеклянные подложки.

Рентгеновская дифракция пленок оксида ниобия показала, что они имеют аморфную структуру как при напылении на вращающуюся подложку, так и при напылении на неподвижную подложку: на дифрактограммах присутствуют только гало от неупорядоченной структуры.

Рентгеновская дифрактограмма, полученная от пленки магния, нанесенной на вращающуюся подложку, значительно отличается от рентгенограммы массивного образца магния с равновесной структурой (в нашем случае это фрагмент мишени, см. рис. 4). Наблюдаются две особенности. Во-первых, на дифрактограмме от пленки присутствует только два интенсивных максимума, в то время как от равновесной структуры получают значительно большее количество пиков. Идентификация имеющихся пиков не однозначна, тем не менее, можно предположить, что они получены в результате отражения от сильно текстурированного магния, поскольку соответствуют дифракции на семействе плоскостей (002) и (004), хотя и смещенных относительно равновесных положений на пол-градуса. Во-вторых, первый

пик характеризуется наличием, так называемых, сателлитов (вставка на рис. 4), обычно связываемых с многослойностью структуры [6,7]. Наличие сателлитов вокруг главного пика согласуется с предположением о том, что пленка магния, напыляемая на вращение, представляет собой слоистую структуру, состоящую из чередующихся слоев магния и оксида магния.

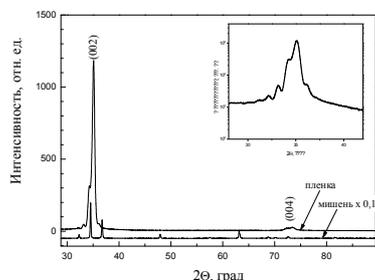


Рис. 4. Рентгеновская дифракция от пленки магния, нанесенной на вращающуюся подложку, а также от материала мишени

Наличие прослоек оксида магния подтверждается двумя экспериментами. Во-первых, после отжига пленки при температуре 450 °С в вакууме в присутствии небольшого количества водорода ($P_{H_2} \approx 1/3$ атм.) сателлиты вокруг основного пика пропадают (рис. 5, а). Мы полагаем, что это связано с разрушением слоистой структуры в результате термической активации процессов диффузии, а также возможным частичном восстановлении оксида магния. Во-вторых, структура пленки магния, напыленной на неподвижную подложку, совпадает со структурой отожженной пленки, полученной при периодическом осаждении материала на подложку, то есть - на вращающуюся подложку (рис. 5. б), на ней также отсутствуют сателлитные пики. Следует подчеркнуть, что в случае напыления на неподвижную подложку осаждение материала осуществляется в течение всего процесса напыления и оксидных слоев не возникает.

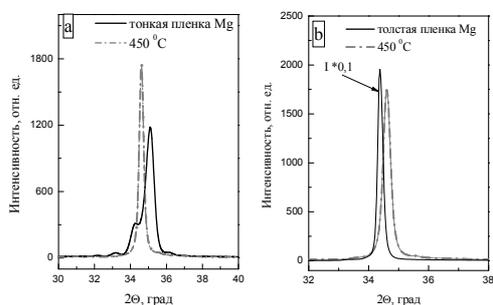


Рис. 5. Рентгеновская дифракция (основной максимум) пленок магния, напыленных на вращение в исходном состоянии и после отжига (а), а также отожженной пленки магния полученной на вращающейся подложке и пленке магния, напыленной на неподвижную подложку (б)

Многослойная структура $(Mg/NbO)_{82}$ (индекс 82 означает количество бислоев) была получена при осаждении магния на подложку через V-образный

экран, в то время как осаждение оксида ниобия осуществлялось без использования экрана. Поэтому полученные многослойные образцы отличались друг от друга толщиной магниевой прослойки. Толщина слоев оксида ниобия во всех случаях составляла примерно 0,96 нм. На рис. 6 показаны результаты малоугловой рентгеновской рефлектометрии многослойных пленок $(Mg/NbO)_{82}$ для различной толщины магниевых слоев. Характер зависимостей отличается от таковых для чистых пленок магния и оксида ниобия – осцилляции интенсивности практически отсутствуют, а вместо них наблюдаются единичные пики, которые в случае малоуглового рассеяния обычно интерпретируются как результат дифракции на периодической структуре, состоящей из последовательно расположенных бислоев [5]. Полученные кривые пересчитывались в соответствии с выражением (2), результаты представлены в табл. 3.

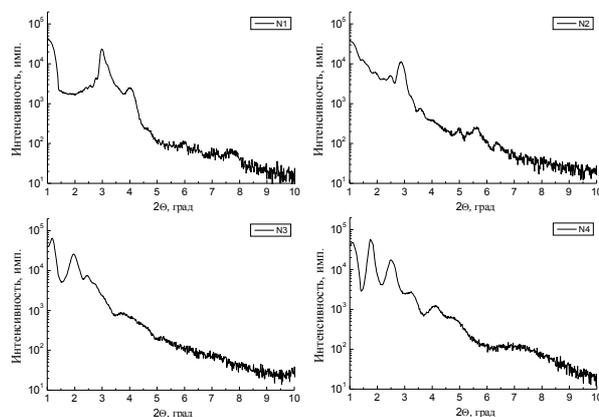


Рис. 6. Рентгеновская малоугловая рефлектометрия образцов многослойных структур $(Mg/NbO)_{82}$, отличающихся толщиной одного бислоя

Таблица 3
Рассчитанные значения толщины бислоя Mg/NbO в зависимости от положения многослойной пленки $(Mg/NbO)_{82}$ на подложкодержателе

Образец Mg, №	Расстояние от края подложкодержателя, мм	Расч. толщ. бислоя d, нм
1	42	2,9
2	93	3,1
3	150	4,5
4	192	5,0

Качественно полученные результаты хорошо согласуются с толщинами, полученными для отдельных слоёв пленок магния и оксида ниобия. Количественное соответствие (сумма толщин слоев магния и оксида ниобия должна быть равна толщине бислоя Mg/Nb-O в многослойной структуре) не абсолютное, погрешность достигает 30 %. Однако этот результат вполне объясним, поскольку точность расчетов рефлектограмм в значительной степени

зависит от структурного совершенства межфазной границы [6].

Увеличение толщины слоя магния в многослойной структуре $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$ приводит к значительному уменьшению электрического сопротивления пленок. На рис. 7 приведена зависимость электрического сопротивления образцов $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$ от номинальной толщины одного бислоя $(\text{Mg}+\text{NbO})$. Толщина бислоя получена в результате аппроксимации значений, приведенных в табл. 3, на всю длину подложкодержателя. Следует подчеркнуть, что увеличение толщины бислоя происходит за счет увеличения толщины слоя магния, прослойка из оксида ниобия во всех образцах оставалась постоянной ($\sim 0,96$ нм).

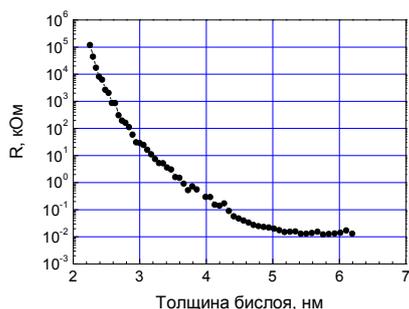


Рис. 7. Зависимость электрического сопротивления многослойной структуры $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$ от номинальной толщины одного бислоя

Зависимость электрического сопротивления многослойной структуры $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$ имеет нелинейный, характер. Увеличение толщины одного бислоя в два раза (с 2,2 до 4,4 нм) уменьшает сопротивление структуры на шесть порядков. При дальнейшем росте толщины (от 5 нм) сопротивление меняется слабо. Данная зависимость аналогична зависимостям сопротивления композитов Ni-NbO от концентрации металлической фазы [10,11]. В композитах подобный вид зависимости связывается с изменением механизма электропереноса при переходе концентрации металлической фазы через порог перколяции [11]. Логично предположить, что в случае многослойной структуры Mg/NbO происходит нечто аналогичное. Очевидно, что в том случае, когда толщина бислоев составляет 5 и более нм сопротивление многослойной структуры определяется переносом электронов вдоль слоев магния. Тонкие слои оксида ниобия, полученного напылением, не вносят определяющий вклад в проводимость – слои магния шунтируют их. При толщинах бислоя менее 4 нм (т.е. при номинальных толщинах магния менее 3 нм) слои магния могут быть не сплошными. Это косвенно подтверждается данными малоугловой рефлектометрии (см. рис. 3, образец 1). В этом случае формируемая структура оказывается подобна композиту: металлическая фаза представляет собой не сплошные слои, а нанометровые области, расположенные в объеме диэлектрика. Электроперенос такой структуры определяется прыжковой проводимостью, с соответствующими высокими значениями электросопротивления [10,11].

Выводы

При напылении пленки магния в режиме, при котором длительность периодических циклов осаждения материала меньше, чем период нахождения полученного слоя в разряженном аргоне ($7 \cdot 10^{-4}$ Торр) без конденсации материала, происходит формирование слоистой структуры. Слои магния оказываются разделенными слоями оксида магния, формирующимися за то время, когда подложка находится вне потока конденсирующихся атомов.

Использование V-образного экрана, размещенного между мишенью и подложкой, позволяет формировать на подложке покрытие с градиентом толщины, направленным вдоль поверхности подложки.

При напылении тонкой пленки магния на аморфные или монокристаллические неметаллические подложки происходит формирование текстурированного кристаллического покрытия.

Последовательное осаждение магния и оксида ниобия на вращающиеся подложки позволяет получить многослойную наноструктуру с толщинами бислоев $(\text{Mg}+\text{NbO})$ порядка нескольких нанометров.

Зависимость электрического сопротивления многослойной наноструктуры $(\text{Mg}/\text{NbO})_{82}$ от толщины бислоя аналогична концентрационной зависимости сопротивления в композитах Ni-NbO, что позволяет предполагать наличие смены механизма электропереноса и изменение структуры (переход от композитной к многослойной) при увеличении номинальной толщины слоев магния.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-02-05920).

Литература

1. Тарасов, Б.П. Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов [Текст] / Б.П. Тарасов // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2005. - №.12. – С.14-37.
2. Андриевский, Р.А. Водород в наноструктурах [Текст] / Р.А. Андриевский // УФН. – 2007. – Т.177. -№.7.- С. 721-735.
3. Microscopic Study on Hydrogenation Mechanism of MgH_2 Catalyzed by Nb_2O_5 [Текст] / Shigehito I., Umeda A., Wakasugi T., Ma T., Yamagami R. // Materials transactions. – 2014. – V.55. – P. 1175-1178.
4. Barkhordarian, G. Kinetic investigation of the effect of milling time on the hydrogen sorption reaction of magnesium catalyzed with different Nb_2O_5 contents [Текст] / Barkhordarian G., Klassen T., Bormann R. // Journal of Alloys and Compounds. – 2006. - V. 407. – P. 249–255
5. Als-Nielsen, J., McMorrow D. Elements of Modern X-ray Physics [Текст] // New York: John Wiley & Sons, 2011. – 434 p.
6. Polarized neutron reflectometry: Recent developments and perspectives [Текст] / G. P. Felcher, S. G. E Te Velthuis, A. Rühm, W. Donner // Physica B. - 201. - V.297. - P.87-93.
7. Федосюк, В.М. Многослойные магнитные структуры [Текст] / В.М. Федосюк – Минск: БГУ, 2000. – 197 с.
8. Чичерская, А.Л. Скорость распыления металлов в тлеющем разряде постоянного тока, используемом в атомно-эмиссионной спектроскопии [Текст] / А.Л. Чи-

черская, А.А. Пупышев // Аналитика и контроль – 2015. – Т.19. –№. 3. – С.230-241.

9. Берлин, В.Е. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением [Текст]/ В.Е. Берлин, Л.А. Сейдман - М.: Техносфера. - 2015. - 256 с.

10. Термическая стабильность, структура и фазовый состав композитов $Ni_x(NbO)_{100-x}$ [Текст] / К.И. Семенов, М.А. Каширин, О.В. Стогней, А. Д. Аль-Малики // По-

верхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2016. – №.10. - С.98-103.

11. Влияние типа матрицы на магнитотранспортные свойства композитных систем Ni-AlO и Ni-NbO [Текст] / О.В. Стогней, А.Дж. Аль-Малики, А.А. Гребенников, К.И. Семенов, Е.О. Буловацкая // Физика и техника полупроводников. – 2016. - №.6. - С. 724-730.

Воронежский государственный технический университет

CREATION OF Mg/NbO MULTILAYERED NANOSTRUCTURES

O.V. Stognei, Doctor of Science, full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sto@sci.vrn.ru

A.V. Sitnikov, Doctor of Science, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sitnikov04@mail.ru

A.N. Smirnov, student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: deadpunk@mail.ru

K.I. Semenko, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: konst1990i@yandex.ru

V.V. Chernichenko, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: vlad1427@yandex.ru

The magnesium thin films, niobium oxide thin films, and multilayered (Mg/NbO)₈₂ thin films nanostructures containing 82 bilayer (Mg + NbO) have been prepared by ion beam sputtering of oxide (Nb-O) and metal (Mg) targets with subsequent deposition of the material on the substrate rotating around the targets. Based on the results obtained by small-angle X-ray reflectometry and x-ray diffractometry it has been shown that a layered structure where Mg layers are separated by the magnesium oxide, formed during the time when the substrate is located outside of the condensable atoms flow, presence in the Mg thin films. The structure of the deposited magnesium films is crystalline with a pronounced texture, structure of niobium oxide films is amorphous and homogeneous. Using the V-shaped shield the (Mg/NbO)₈₂ multilayer nanostructures with varying thickness of the magnesium layer have been obtained. The dependence of the resistance of the multilayer structure on the nominal thickness of the bilayer, varying in the range of 2.2 - 6.2 nm has been investigated. It is assumed the presence of electrical percolation transition in the multilayer system with an increase of the bilayer thickness

Key words: ion beam deposition, small-angle X-ray reflectometry, multilayer nanostructure, electrotransport mechanism

References

1. B.P. Tarasov Metody hraneniya vodoroda i vozmozhnosti ispol'zovaniya metallogidridov [Method of hydrogen storage] // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Alternativnaya ehnergetika i ehkologiya» – 2005. - №.12. – С.14-37.
2. R.A. Andrievskij Vodorod v nanostrukturah [Hydrogen in nanostructures] // UFN. – 2007. – Т.177. -№.7. - С. 721-735.
3. Shigehito I. Microscopic Study on Hydrogenation Mechanism of MgH₂ Catalyzed by Nb₂O₅ / Shigehito I., Umeda A., Wakasugi T., Ma T., Yamagami R. // Materials transactions. – 2014. – V.55. – p. 1175-1178.
4. Barkhordarian G. Kinetic investigation of the effect of milling time on the hydrogen sorption reaction of magnesium catalyzed with different Nb₂O₅ contents // Barkhordarian G., Klassen T., Bormann R. // Journal of Alloys and Compounds. – 2006. - V. 407. – p. 249–255
5. Als-Nielsen J., McMorrow D. Elements of Modern X-ray Physics // New York: John Wiley & Sons, 2011. – 434 p.
6. Felcher G. P. Polarized neutron reflectometry: Recent developments and perspectives / Felcher G. P., Te Velthuis S. G. E., Rühm A., Donner W. // Physica B. - 201. - V.297. - P.87-93.
7. Fedosyuk V.M. Mnogoslojnye magnitnye struktury [Multilayered magnetic structures]– Minsk: BGU. – 2000. – 197 s.
8. Chicherskaya A.L. Skorost' raspyleniya metallov v tleyushchem razryade postoyannogo toka, ispol'zuemom v atomno-ehmissionnoj spektrometrii [Metal spraying rate in the glow discharge of direct current, used in atomic emission spectrometry] / Chicherskaya A.L., Pupyshov A.A. // Analitika i kontrol' – 2015. – Т.19. –№. 3. – С.230-241.
9. Berlin V.E., Sejdman L.A. Poluchenie tonkih plenok reaktivnym magnetronnym raspyleniem [Obtaining thin films by reactive magnetron sputtering] - М.: Техносфера. - 2015. - 256 с.
10. Semenko K.I. Termicheskaya stabil'nost', struktura i fazovyj sostav kompozitov $Ni_x(NbO)_{100-x}$ [Thermal stability, structure and phase composition of composites $Ni_x(NbO)_{100-x}$] / Semenko K.I., Kashirin M.A., Stognei O.V., Al'-Maliki A. D. // Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya. - 2016. – №.10. - С.98-103.
11. Stognei O.V. Vliyanie tipa matricy na magnitotransportnye svoystva kompozitnyh sistem Ni-AlO i Ni-NbO [Effect of matrix type Magnetotransport properties of composite systems Ni-AlO and Ni-NbO] / Stognei O.V., Al'-Maliki A.Dzh., Grebennikov A.A., Semenko K.I., Bulovackaya E.O. // Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2016. - №.6. - s.724-730.

СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК CdS, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ МЕДИ И НАТРИЯ

А.Н. Нитута, В.Н. Семенов, Л.Н. Никитин, А.Н. Лукин, Д.А. Минаков, О.В. Ребенок

Представлены результаты исследования тонких пленок CdS, совместно легированных ионами меди и натрия концентрацией $10^{-3} - 10^{-7}$ ат. %. Синтезированные образцы были получены при температуре 400 °С. Рентгенофазовый анализ показал, что осажденные пленки формируются в виде вюртцитной структуры и сильно текстурированы в направлении (002). С повышением концентрации примеси преимущественная ориентация микрокристалла разрушается, и образец становится текстурирован в направлении (101). Показано, что введение небольшой концентрации примеси не оказывает существенного влияния на оптическую ширину запрещенной зоны пленок. Изменение концентрации легирующей добавки приводит к увеличению интенсивности фотолюминесценции образцов. Это связано с тем, что при введении примеси новые дефекты приводят к образованию центров излучательной рекомбинации, а также из-за снижения роли центров безызлучательной рекомбинации. Активные примеси Na^+ и Cu^{2+} при больших концентрациях могут приводить к образованию неактивных дефектов, поэтому происходит уменьшение интенсивности люминесценции образцов CdS. Также ионы натрия блокируют часть каналов конкурирующей рекомбинации, которыми могут быть, например, центры типа V_{Cd} , в результате чего происходит снижение количества собственных, а также примесных дефектов, вследствие этого происходит уменьшение интенсивности люминесценции пленок, совместно легированных ионами Cu^{2+} и Na^+ , по сравнению с отдельно легированными ионами меди

Ключевые слова: метод пиролиза аэрозоля, тонкие пленки, сульфид кадмия, рентгенофазовый анализ, оптические спектры пропускания, спектры фотолюминесценции

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые соединения $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ и их твердые растворы благодаря своим оптическим, фотолюминесцентным и фоточувствительным свойствам являются перспективными материалами для науки и техники. [1].

Удобным способом получения пленок является метод пиролиза аэрозоля тиомочевинных координационных соединений (ТКС), так как простота управления механизмом осаждения позволяет в широких пределах варьировать состав тонкопленочных композиций, а также вводить активирующие примеси в процессе синтеза слоев при сравнительно низких температурах, а это, в свою очередь дает возможность получать пленки с заданной дефектной структурой [2].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ранее нами были исследованы оптические и структурные свойства образцов легированных отдельно ионами меди и натрия [3-5], полученных

из комплексов $[\text{Cd}(\text{N}_2\text{H}_4\text{CS})_2\text{Cl}_2]$ и $[\text{Cd}(\text{N}_2\text{H}_4\text{CS})_2\text{Br}_2]$.

Целью данной работы являлось исследование совместного влияния примеси ионов меди и натрия на структурные и оптические свойства тонких пленок CdS, полученных из растворов тиомочевинных координационных соединений хлорида кадмия.

Синтез пленок сульфида кадмия проводили из водных растворов комплекса $[\text{Cd}(\text{N}_2\text{H}_4\text{CS})_2\text{Cl}_2]$. Для получения образцов использовали хлорид кадмия $\text{CdCl}_2 \times 2,5\text{H}_2\text{O}$ марки "х.ч." и тиомочевину $\text{N}_2\text{H}_4\text{CS}$ (thio) марки "х.ч.", концентрацией 0.1 моль/л и 0.2 моль/л соответственно. В качестве легирующей добавки использовали CuCl_2 и NaCl , концентрация которых в распыляемом растворе варьировалась в пределах $10^{-3} - 10^{-7}$ моль/л. Проведенные ранее исследования показали [6, 7], что концентрация активирующей примеси в растворе соответствует ее концентрации в пленке.

В качестве подложек использовали кварц и ситалл, которые предварительно проходили необходимую обработку для очистки поверхности. Осаждение сульфида кадмия происходило при 400°C в течение одной минуты. Толщина синтезированных пленок 500 нм.

Оптические свойства пленок CdS были изучены с помощью спектрометра SHIMADZU.

Оптическую ширину запрещенной зоны E_g определяли из спектров пропускания по краю собственного поглощения из спектральной зависимости $D = f(h\nu)$ (D – оптическая плотность).

Рентгенофазовый анализ (РФА), используемый в работе, необходим для определения фазового состава и структуры пленок CdS. Анализ образцов, полученных на кварцевых подложках, проводили на рентгеновском

Нитута Асият Насрулаховна - ВГУ, аспирант, e-mail: asiya.nituta@yandex.ru

Семенов Виктор Николаевич - ВГУ, д-р техн. наук, декан, e-mail office@chem.vsu.ru

Никитин Леонид Николаевич – ВГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail l.n.nikitin@mail.ru;

Лукин Анатолий Николаевич – ВГУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail alukin@phys.vsu.ru

Минаков Дмитрий Анатольевич - ВГУ, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, e-mail minakov_d_a@mail.ru

Ребенок Ольга Владимировна – ВГУ, студент, e-mail orebenok@mail.ru

дифрактометре PANalytical EMPYREAN (излучение $\text{CuK}_{\alpha 1}$).

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измеряли с использованием экспериментальной установки, созданной на базе волоконно-оптического спектрометра USB4000-VIS-NIR (350 - 1000 нм) фирмы Ocean Optics. В качестве источников возбуждения люминесценции использовали лазерный диод, излучающий при длине волны 405 нм [8]. Результаты измерения спектров показали, что ситалловая подложка сильно люминесцирует в области 525 нм, что было учтено при описании полученных спектров ФЛ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгенофазового анализа показали, что все исследуемые образцы CdS имеют структуру вюрцита (табл. 1). На дифрактограммах пленок с совместным содержанием ионов меди и натрия $10^{-3} - 10^{-7}$ ат. % не присутствуют дополнительные рефлексы, относящиеся к их соединениям, так как они не выделяются в виде самостоятельной фазы, а встраиваются в решетку сульфида кадмия (рис. 1).

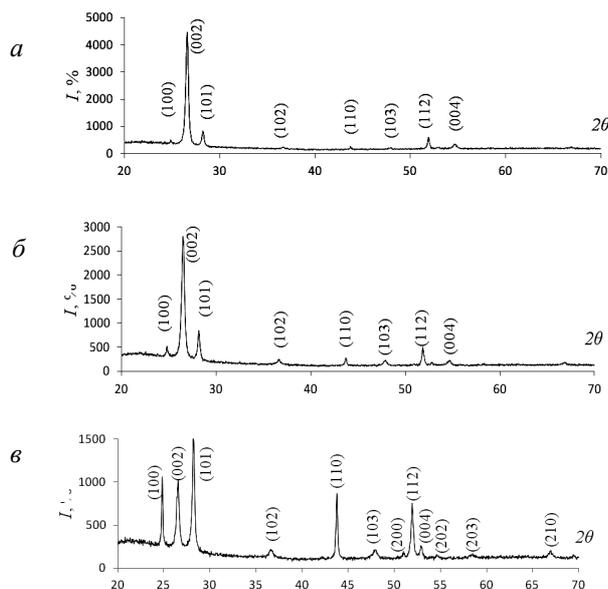


Рис. 1. Дифрактограммы пленок CdS, полученных из $[\text{Cd}(\text{N}_2\text{H}_4\text{CS})_2\text{Cl}_2]$ при температуре 400°C : а - чистые; б, в - совместно легированные ионами меди и натрия концентрацией 10^{-6} , 10^{-3} ат. % Cu^{2+} и Na^+ ($C_{\text{Cu}^{2+}} = C_{\text{Na}^+}$), соответственно

Из полученных данных видно, что нелегированные образцы и с содержанием примеси концентрацией $10^{-4} - 10^{-7}$ ат. % являются поликристаллическими с самой интенсивной линией, имеющей индекс (002). Это свидетельствует о том, что пленки сильно текстурированы в этом направлении.

На рис. 1 в дифрактограмма образца с концентрацией легирующей добавки 10^{-3} ат. %,

содержащая линии, интенсивность которых совпадает с известными значениями из базы данных, как и должно, происходит при исчезновении текстуры.

При увеличении концентрации примеси преимущественная ориентация микрокристалла разрушается и образец становится сильно текстурирован в направлении (101).

Таблица 1

Межплоскостные расстояния в пленках CdS, совместно легированных ионами меди и натрия ($C_{\text{Cu}^{2+}} = C_{\text{Na}^+}$)

Концентрация ионов меди и натрия, ат. %										От- се- се- ние 10^{-6} d , нм
0		10^{-6}		0		10^{-6}		0		
d , нм	I , %	d , нм	I , %	d , нм	I , %	d , нм	I , %	d , нм	I , %	
0.	1	0.	1	0.	1	0.	1	0.	10	0.3
33	0	33	0	33	0	33	0	33	0	35
57	0	57	0	57	0	57	0	57	0	7
0.	2	0.	2	0.	2	0.	2	0.	25	0.3
31	5.	31	5.	31	5.	31	5.	31	.3	16
62	3	62	3	62	3	62	3	62	4	2
0.	4	0.	4	0.	4	0.	4	0.	6.	0.2
20	9	20	9	20	9	20	9	20	95	06
69	5	69	5	69	5	69	5	69	9	9

Обозначения: d – межплоскостное расстояние в пленках, нм; I – интенсивность дифракционного максимума, %

Оптическую ширину запрещенной зоны E_g определяли из спектров пропускания по краю собственного поглощения из спектральной зависимости $D = f(h\nu)$ (D – оптическая плотность).

На рис. 2 представлены спектры пропускания для синтезированных образцов.

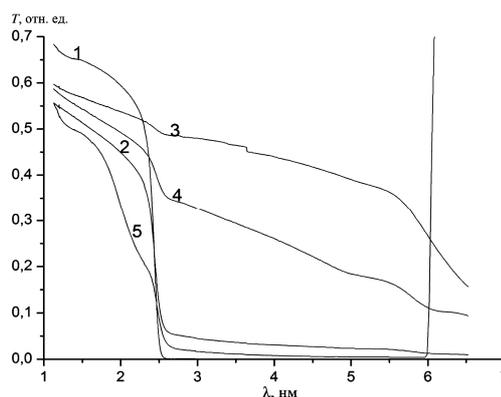


Рис. 2. Спектры пропускания для пиролитических пленок CdS, совместно легированных ионами меди и натрия концентрацией: 1 - 0, 2 - 10^{-6} , 3 - 10^{-5} , 4 - 10^{-4} , 5 - 10^{-3} ат. % Cu^{2+} и Na^+ ($C_{\text{Cu}^{2+}} = C_{\text{Na}^+}$)

С помощью метода экстраполяции линейных участков была построена степенная зависимость коэффициента поглощения от энергии фотона для синтезированных пленок (Рис. 3).

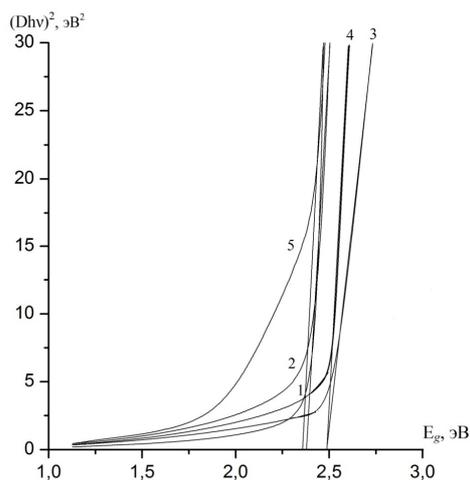


Рис. 3. Степенные зависимости коэффициента поглощения от энергии фотона для пиролитических пленок CdS, совместно легированных ионами меди и натрия концентрацией: 1 – 0, 2 – 10^{-7} , 3 – 10^{-5} , 4 – 10^{-4} , 5 – 10^{-3} ат. % Cu^{2+} и Na^+ ($C_{\text{Cu}^{2+}} = C_{\text{Na}^+}$)

Из графиков экстраполяции линейных участков получим ширину запрещенной зоны синтезированных образцов (табл. 2).

Таблица 2

Оптическая ширина запрещенной зоны пленок CdS, совместно легированных ионами меди и натрия ($C_{\text{Cu}^{2+}} = C_{\text{Na}^+}$)

Содержание ионов меди и натрия, моль/л	E_g , эВ
0	2.40
10^{-6}	2.40
10^{-5}	2.48
10^{-4}	2.48
10^{-3}	2.36

Введение примеси меди и натрия в концентрациях 10^{-7} - 10^{-3} ат. % не оказывает существенного влияния на оптическую ширину запрещенной зоны пленок.

В работе были исследованы люминесцентные свойства пленок сульфида кадмия, совместно легированного ионами меди и натрия. Спектры ФЛ исследуемых образцов представляют собой широкие сложные полосы, лежащие в области от 600 нм до 900 нм (рис. 4).

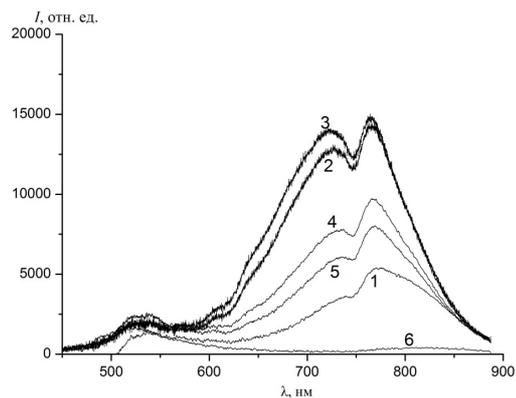


Рис. 4. Спектры ФЛ пленок CdS, совместно легированных ионами меди и натрия концентрацией: 1 – 0, 2 – 10^{-7} , 3 – 10^{-6} , 4 – 10^{-5} , 5 – 10^{-4} , 6 – 10^{-3} ат. % Cu^{2+} и Na^+ ($C_{\text{Cu}^{2+}} = C_{\text{Na}^+}$)

В работах [9-11] описана возможная структура центров люминесценции в пленках CdS. Согласно представлениям, развитым в этих работах центры люминесценции представляют собой комплексы типа $(V_{\text{Me}}, \text{Me}_i)$, (Cl_s^-) и (V_{Cd}, V_s) , которые могут находиться в разном зарядовом состоянии, образуя широкие полосы люминесценции. Роль Me_i выполняют ионы Cd.

Увеличение интенсивности ФЛ совместно легированных образцов связано с тем, что ионы Cu^{2+} и Na^+ снижают концентрацию безызлучательных каналов рекомбинации. Согласно [12] примесь иона натрия не приводит к образованию новых центров свечения, а примесь иона меди образует комплексы $(O_s^* \text{Cu}_i^{2+} V_{\text{Me}}^{2-})^x$, $(O_s^* \text{Cu}_i^{2+} V_{\text{Me}}^-)$, $(O_s^* \text{Cu}_i^+ V_{\text{Me}}^{2-})$ [13], которые добавляются к собственным дефектам ($\{\text{Cl}_s^-\}$, $\{V_{\text{Me}}, \text{Me}_i\}$, $\{V_{\text{Cd}}, V_s\}$), следовательно, повышается концентрация дефектов, ответственных за излучательную рекомбинацию. Роль кислорода обусловлена тем, что осаждение пленок происходит на воздухе.

Из рис. 4 видно, что при совместном легировании ионами меди и натрия интенсивность ФЛ возрастает, достигая максимума для $C_{\text{Cu}, \text{Na}} = 10^{-6}$ ат. %.

Уменьшение концентрации примеси до 10^{-7} ат. % в совместно легированных пленках способствует небольшому снижению интенсивности люминесценции образцов. В пленках содержащих отдельно ионы меди для концентрации 10^{-7} ат. % наблюдается максимум интенсивности свечения, а ее снижение происходит при $C_{\text{Cu}} = 10^{-8}$ ат. %.

При увеличении концентрации примеси в совместно легированных пленках до 10^{-3} ат. % (Рис. 4, кривая 6) наблюдается уменьшение свечения образцов за счет образования кластеров меди Cu_n , где $n = 2, 3, \dots$, которые являются центрами безызлучательной рекомбинации.

Максимальное свечение в области длины волны $\lambda = 518$ нм при увеличении концентрации

легирующей добавки до 10^{-3} ат. % связано с влиянием подложки, которое есть во всех образцах (рис. 5).

При увеличении концентрации ионов меди от 10^{-7} до 10^{-4} ат. % наблюдается смещение максимума люминесценции в длинноволновую область $\lambda = 733$ нм, это связано с образованием дефектов $(Cu_{Cd}, Cu_i)^x$, $(Cu_{Cd}, Cl_s)'$ (рис. 5, кривые 2, 3, 4, 5). Аналогичные результаты наблюдаются и для отдельно легированных ионами меди пленок CdS.

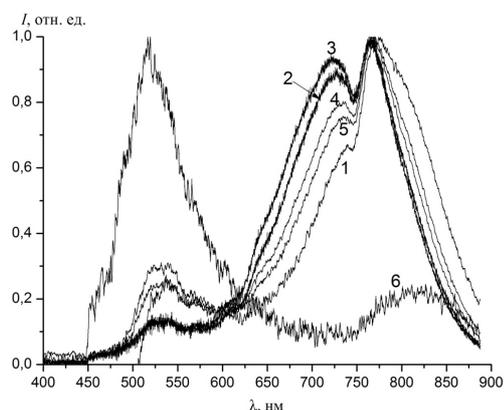
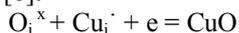


Рис. 5. Нормированные спектры ФЛ пленок CdS, совместно легированных ионами меди и натрия концентрацией: 1 – 0, 2 – 10^{-7} , 3 – 10^{-6} , 4 – 10^{-5} , 5 – 10^{-4} , 6 – 10^{-3} ат. % Cu^{2+} и Na^+ ($C_{Cu^{2+}} = C_{Na^+}$)

Дальнейшее изменение количества активирующей добавки до 10^{-3} ат. % приводит к образованию дефектов $(V_{Cd}, O_s)^x$, $(V_{Cd}, O_i)^x$ $\lambda = 815$ нм, это можно объяснить нарушением структуры пленки за счет легирования ее медью и компенсацией образуемых нарушений кислородом (рис. 5, кривая 6). При образовании пленки кислород занимает вакансии серы, составляя конкуренцию хлору, оставшемуся в пленке после разложения тиомочевинного комплекса. В процессе же залечивания дефектов большинство вакансий уже заняты, и нарушение структуры пленки при внедрении меди стабилизирует кислород в междоузлиях, то есть происходит компенсация объемного несоответствия в сульфиде кадмия кислородом путем соактивации [14].

С увеличением концентрации ионов меди после формирования твердого раствора замещения происходит образование O_i^x и Cu_i^{\cdot} . Когда расстояние между этими дефектами становится достаточно малым, происходит взаимодействие по следующей схеме [6]:



Сравнение спектров фотолюминесценции (Рис. 6) пленок легированных отдельно ионами меди $C_{Me} = 10^{-6}$ ат. % с образцами, содержащими сразу две активирующие примеси $C_{Cu,Na} = 10^{-6}$ ат. %, показало, что ионы натрия блокируют часть каналов конкурирующей рекомбинации, которыми могут быть, например, центры типа V_{Cd} , так как при синтезе пленок ионы металлов могут занимать вакантные места в решетке и на поверхности,

снижая количество собственных, а также примесных дефектов, из-за чего происходит уменьшение интенсивности люминесценции пленок совместно легированных ионами Cu^{2+} и Na^+ , по сравнению с отдельно легированными ионами меди [5, 12].

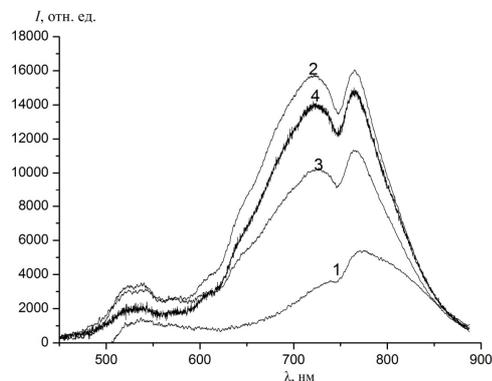


Рис. 6. Спектры ФЛ пленок CdS: 1 – чистый образец, 2 – легированные ионами меди, 3 – ионами натрия, 4 – совместно легированные ионами меди и натрия ($C_{Me} = 10^{-6}$ ат. % для кривых 2-4)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пленки CdS, осажденные из тиомочевинно-хлоридных координационных соединений при температуре $400^\circ C$ выделяются в виде вюртцитной структуры и сильно текстурированы в направлении (002). При увеличении концентрации примеси преимущественная ориентация микрокристалла разрушается и образец становится текстурирован в направлении (101).

Введение примеси ионов меди и натрия в концентрациях 10^{-7} - 10^{-3} ат. % не оказывает существенного влияния на оптическую ширину запрещенной зоны пленок, ввиду небольшой концентрации ионов Cu^{2+} и Na^+ .

Увеличение интенсивности ФЛ совместно легированных образцов связано с изменением концентрации активирующей добавки Cu^{2+} и Na^+ . Обнаружены максимумы полос люминесценции, отвечающие комплексам собственных и примесных дефектов: (Cl_s^{\cdot}) , (V_{Me}, Me_i) , (V_{Cd}, V_s) , $(Cu_{Cd}, Cu_i)^x$, $(Cu_{Cd}, Cl_s)'$, $(V_{Cd}, O_s)^x$, $(V_{Cd}, O_i)^x$, $(O_s^{\cdot} Cu_i^{2+} V_{Me}^{2-})^x$, $(O_s^{\cdot} Cu_i^{2+} V_{Me}^{\cdot})'$, $(O_s^{\cdot} Cu_i^{\cdot} V_{Me}^{2-})'$. Введение легирующей добавки иона натрия не приводит к образованию новых центров свечения в сульфиде кадмия, отвечающих за наблюдаемые максимумы. Увеличение интенсивности люминесценции образцов легированных ионами щелочных металлов связано с блокировкой каналов безызлучательной рекомбинации, конкурирующих с рекомбинацией на описанных выше центрах свечения, что делает более эффективной излучательную рекомбинацию. Активная примесь Na^+ при больших концентрациях может приводить к разрушению сложных центров свечения с образованием неактивных дефектов, как в

отдельно, так и совместно легированных пленках. Поэтому происходит уменьшение интенсивности люминесценции образцов CdS совместно легированных ионами натрия и меди, по сравнению с отдельно легированными ионами Cu^{2+} .

Следовательно, в качестве активной примеси можно использовать лишь ионы меди, которые, по сравнению с ионами натрия, значительно увеличивают интенсивность люминесценции или проводить совместное легирование при небольших концентрациях активаторов.

Авторы благодарят Центр коллективного пользования Воронежского государственного университета за предоставленное экспериментальное оборудование.

Литература

1. Левин, М.Н. Фотоэлектрические преобразователи на варизонных гетероструктурах $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{Cu}_2\text{S}$ [Текст] / М.Н. Левин, В.Н. Семенов, О.В. Остапенко // Письма в ЖТФ. - 2002. - Т. 28. Вып. 10. - С. 19-23.
2. Наумов, А.В. Тиомочевинные координационные соединения в процессах синтеза сульфидов металлов [Текст] / А.В. Наумов, В.Н. Семенов, Е.М. Авербах // Химическая промышленность. - 2003. - Т. 80. № 2. - С. 17-26 (69-78).
3. Лукин, А.Н. Люминесценция и оптические свойства пленок $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{S}$, легированных ионами меди [Текст] / А.Н. Лукин, В.Н. Семенов, В.Г. Ключев // Известия РАН. Серия Физическая. - 2015. - Т. 79. № 2. - С. 269-272.
4. Болгова, Т.Г. Люминесцентные свойства поликристаллических пленок сульфида кадмия, легированных металлами первой группы [Текст] / Т.Г. Болгова «и др.» // Вестн. Воронежск. ун-та. Физика, математика. - 2005. - № 2. - С. 38-44.
5. Болгова, Т.Г. Люминесценция и фотопроводимость пленок сульфида кадмия, легированных элементами Iа группы [Текст] / Т.Г. Болгова «и др.» // Неорганические материалы. - 2006. - Т. 42. № 5. - С. 523-529

Воронежский государственный университет
Воронежский государственный технический университет

STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF FILMS OF CdS DOPED WITH COPPER IONS AND SODIUM

- A.N. Nituta**, graduate, Voronezh State University, Voronezh, Russia Federation, e-mail asiyat.nituta@yandex.ru
V.N. Semenov, Doctor of of Engineering Sciences, Dean, head of Department of General and inorganic chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia Federation, e-mail office@chem.vsu.ru
L.N. Nikitin, Candidate of Engineering Sciences, docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia Federation, e-mail l.n.nikitin@mail.ru
A.N. Lukin, Candidate of Physico-mathematical Sciences, docent, Voronezh State University, Voronezh, Russia Federation, e-mail alukin@phys.vsu.ru
D.A. Minakov, Candidate of Physico-mathematical Sciences, senior researcher, Voronezh State University, Voronezh, Russia Federation, e-mail minakov_d_a@mail.ru
O.V. Rebenok, student, Voronezh State University, Voronezh, Russia Federation, e-mail orebenok@mail.ru

Presents results of a study of CdS thin films, doped together with copper ions and sodium concentration of $10^{-3} - 10^{-7}$ at. %. The synthesized samples were obtained at a temperature of 400°C . X-ray analysis showed that the precipitated film formed as wurtzite structure and strong are textured in the direction (002). With increasing of impurity concentration the preferred

orientation of the microchip is destroyed and the sample is textured in the direction (101). The introduction of a small concentration of impurity has no significant effect on the optical band gap of films. The change in the concentration of dopants leads to an increase of the photoluminescence intensity of the samples. This is due to the fact that with the introduction of new impurity defects lead to the formation of centers of radiative recombination, and also due to the reduction of the role of centers of nonradiative recombination. Active impurities Na^+ and Cu^{2+} at high concentrations can lead to the formation of inactive defects, so there is a reduction in the intensity of luminescence of samples of CdS. Also, the sodium ions block some of the competing recombination channels, which can be, for example, centres like V_{Cd} , resulting in a decrease in the number of own and impurity defects, in consequence of this, there is a decrease in the intensity of luminescence of the films in conjunction doped with ions Cu^{2+} and Na^+ , compared with the separately doped with copper ions

Key words: method of aerosol pyrolysis, thin films, cadmium sulfide, x-ray diffraction, optical transmission spectra, the photoluminescence spectra

References

1. Levin M.N., Semenov V.N., Ostapenko O.V. Fotoelektricheskie preobrazovateli na varizonyh geterostrukturah $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{Cu}_2\text{S}$ [Photovoltaic inverters on graded-gap heterostructures $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}/\text{Cu}_2\text{S}$] // Technical Physics Letters. - 2002. - T. 28. Вып. 10. - С. 19-23.
2. Naumov A.V., Semenov V.N., Auerbach E.M. Tiomochevinye koordinacionnye soedinenija v processah sinteza sul'fidov metallov [Thiourea coordination compounds in the synthesis of metal sulphide] // Chemical industry. - 2003. - T. 80. № 2. - С. 17-26 (69-78).
3. Lukin A.N., Semenov V.N., Kluev V.G. Ljuminescencija i opticheskie svojstva plenok $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{S}$, legirovannyh ionami medi [Luminescence and optical properties $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{S}$ films doped with copper ions] // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. - 2015. - T. 79. № 2. - С. 269-272.
4. Bolgova T.G. «and other» Ljuminescentnye svojstva polikristallicheskih plenok sul'fida kadmija, legirovannyh metallami pervoj grupy [The luminescent properties of polycrystalline films of cadmium sulfide doped with metals of the first group] // Bulletin of Voronezh State University. Physics, mathematics. - 2005. - № 2. - С. 38-44
5. Bolgova T.G. «and other» Ljuminescencija i fotoprovodimost' plenok sul'fida kadmija, legirovannyh jelementami Ia grupy [The luminescence and photoconductivity of cadmium sulfide film doped with elements of group Ia] / T.G. Bolgova «and other» // Inorganic Materials. - 2006. - T. 42. № 5. - С. 523-529
6. Semenov V.N. «and other» Ljuminescentnye svojstva plenok CdS, legirovannogo med'ju, poluchennyh raspyleniem rastvorov na nagretuju podlozhku [Fluorescent properties of films of CdS, doped with copper, the resulting solutions sprayed onto the heated substrate] / V.N. Semenov «and other» // Inorganic Materials. - 1993. - T. 29. № 3. - С. 323-326.
7. Ugai J.A., Semenov V.N., Auerbach E.M. Vlijanie kompleksobrazovanija na poluchenie plenok sul'fida medi iz vodnogo rastvora tiomocheviny i hlorida medi pul'verizacij [Impact of complexation to copper sulphide film from an aqueous solution of copper chloride and thiourea pulverization] // Inorganic Chemistry Journal. - 1981. - T. 26. - С. 271-273.
8. Sarycheva I.N., Yanushevich O.O., Minakov D.A. Russian Patent № RU 2464549 C1, 2012. Newsletter №29 or 12.05.2011
9. Troenie i svojstva tiokarbamidnyh kompleksov kadmija i cinka po dannym kvantovohimicheskogo rascheta [Structure and properties of thiourea complexes of cadmium and zinc according to quantum-chemical calculation] / A.V. Naumov «and other» // Journal of Applied Chemistry. - 2010. - T. 6. - С. 922-925.
10. Samofalova T.V. «and other» Ljuminescencija poluchennyh piroliticheski plenok $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$, legirovannyh ionami medi [Luminescence obtained pyrolytic films $\text{Cd}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{S}$ doped with copper ions] // Journal of Applied Spectroscopy. - 2014. - T. 81. № 1. - С. 88-92.
11. Sheinkman M.K. «and other» Mehanizmy oranzhevoj, krasnoj i infrakrasnoj fotoljuminescencii v monokristallah CdS i parametry sootvetstvujushhijh centrov svechenija [Mechanisms of orange, red and infrared photoluminescence in CdS single crystals and parameters of the respective glow centers] // Solid State Physics. - 1968. - T. 10. №9. - С. 2628-2638.
12. Kluev V.G., Mayorova T.L. Ljuminescencija i jelektricheskie svojstva plenok CdS, legirovannyh kaliem i natriem [Luminescence and electrical properties of CdS films doped with potassium and sodium] // Journal of Applied Spectroscopy. - 2005. - T. 72. №4. - С. 509-513.
13. Morozova N.K., Karetnikau I.A., Blinov V.V. Issledovanie centrov ljuminescencii, objazannyh prisutstviju medi i kisloroda v ZnSe [The study of luminescence centers, which are obliged to the presence of copper and oxygen in ZnSe] // Semiconductor. - 2001. - T. 35. № 1. - С. 25-33.
14. Morozova N.K., Kuznetsov V.A. Sul'fid cinka. Poluchenie i opticheskie svojstva [The zinc sulfide. Preparation and optical properties] - M.: Science, 1987. С. 200.

МАГНИТОСТАТИЧЕСКИЕ И МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТОВ $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

А.Б. Грановский, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.С. Тарасова, В.В. Филиппов

Методом ионно-лучевого распыления осаждены пленки композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ на стеклоткань в инертной среде и при циклическом добавлении кислорода с различным порционным давлением. Анализ кривых намагниченности пленок показал, что структура подложки определяет магнитоэлектрические свойства пленки. В частности, высокая величина магнитной анизотропии (~ 500 Э) пленки поперек волокон ткани задается формой стеклоткани, имеющей длину до 500 мкм при диаметре нити 7 мкм. Выявлено, что частотные зависимости комплексной магнитной проницаемости фрагментированной на поверхности стеклоткани пленки являются суперпозицией характеристик анизотропных фрагментов пленки, расположенных вдоль и поперек измерительного магнитного поля. Апробированный в работе подход позволил получить значительную величину μ'' образцов вплоть до частоты 6-7 ГГц. Измеренные частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения стеклотекстолита, изготовленного из стеклоткани с напыленной на поверхность гетерогенной пленкой, показали значительную величину L в частотном диапазоне от 15 до 37 ГГц. Выявлено, что вид зависимости $L(f)$ зависит от параметров осажденной гетерогенной пленки

Ключевые слова: наноконпозиты, электрические свойства, многослойная гетерогенная структура, удельное электрическое сопротивление

1. Введение

Наногранулированные композиты ферромагнитный металл-диэлектрик являются перспективными объектами исследования в плане их применения в области гигагерцовых частот излучения электромагнитных волн [1-5]. Это объясняется более высокими величинами удельного сопротивления гетерогенных структур относительно гомогенных металлических магнетиков [6-8]. В настоящее время получены наноконпозиты с различным составом металлической и жидкоэлектрической фаз. В качестве ферромагнитной фазы обычно используют переходные металлы Co, Fe, Ni или сплавы на их основе [9-14], а диэлектрическая матрица является оксидными или фторидными соединениями металлов [15-20], а также аморфный углерод с алмазоподобным ближним порядком [21].

Однако, не все композиты после порога перколяции имеют магнитные свойства, необходимые для использования их в высокочастотных устройствах. К такому свойству, ограничивающим практическое применение в качестве функциональных высокочастотных магнитных материалов, можно отнести наличие значительной перпендикулярной магнитной

анизотропии, о чем сообщалось в ряде работ [9, 16, 22-24]. Также остро стоит проблема согласования волнового сопротивления функциональной среды и свободного пространства. Как было показано в ряде работ первую задачу можно решить, создавая многослойную структуру на основе наноконпозита с толщиной слоев соизмеримых со средним диаметром металлических гранул (4-6 нм) [25-28]. Если разделительные прослойки являются высокоомными, т.е. диэлектрическими или композиционными осажденными в присутствии кислорода, то увеличивается удельное сопротивление многослойной гетерогенной структуры, следовательно, уменьшается величина мнимой части диэлектрической проницаемости и волновое сопротивление пленки. Но, как показали измерения, этого недостаточно для согласования волновых сопротивлений пленки и свободного пространства, электромагнитная волна в значительной степени отражается от поверхности тонкопленочного образца. С другой стороны, если пленка нанесена на развитую поверхность, то объем занимаемый магнитоактивным веществом существенно больше, чем толщина покрытия и в этом случае надо рассматривать приведенные параметры среды. Тогда в случае если $\epsilon \gg \mu$ магнитного материала, то при расщеплении его в большом объеме мы имеем:

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \frac{\epsilon}{\mu} = 1 \quad (1)$$

Исходя из приведенных рассуждений была сформирована цель представленной работы. Исследовать высокочастотные магнитные

Грановский Александр Борисович – МГУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: gran60@mail.ru

Калинин Юрий Егорович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: Kalinin48@mail.ru

Ситников Александр Викторович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sitnikov04@mail.ru

Тарасова Оксана Сергеевна – ВГТУ, аспирант, e-mail: oksanchik2603@mail.ru

Филиппов Василий Викторович – ВГТУ, магистр, e-mail: lonesomewolf1994@mail.ru

свойства многослойных композиционных пленок, осажденных на диэлектрическую подложку с развитой поверхностью. В качестве пленки был выбран композит $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ осажденный при циклической подачи кислорода в процессе напыления с концентрацией металлической фазы после порога перколяции, как материал показавший наиболее хорошие магнитодинамические свойства [27]. Подложкой выступало полотно стеклоткани. Стеклоткань является составной частью конструкционного стеклотекстолита, что открывает хорошие перспективы практического использования исследуемого физического свойства.

2. Образцы и методика эксперимента

Для осаждения тонкопленочной структуры композит-композит использовались возможности оригинальной установки ионнолучевого распыления изготовленной на базе вакуумного напылительного поста УВН-2М [29]. В результате глубокой модернизации в камере было размещено 7 ионных источников оригинальной конструкции, которые предназначены для независимого распыления трех мишеней и проведения ионной очистки поверхности подложки перед напылением. Для осаждения композита использовалась мишень, состоящая из металлической пластины сплава $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ размером $280 \times 80 \times 20 \text{ мм}^3$ с равномерно закрепленными на ее поверхности 12 кварцевыми пластинками размером $80 \times 10 \times 2 \text{ мм}^3$. Сораспыление металла и диэлектрика которые не обрзуют между собой химических соединений и твердых растворов путем процессов самоорганизации на поверхности подложки при конденсации из паровой фазы формируют наноразмерную гетерогенную структуру композита металл-диэлектрик. Материалом подложки была стеклоткань, которая полотном размера $1200 \times 250 \text{ мм}^2$ закреплялась на карусели распылительной установки. Перед напылением проводилась ионная очистка поверхности подложки. Параметры спыливания подложки составляли: время процесса 30 минут, ток плазмы 50 мА, напряжение на аноде 2 кВ, давление Ar 5×10^{-4} Торр, ток компенсатора 3А, ккорость вращения подложки 0,2 об/мин. Процесс напыления функционального слоя проходил в квазистатическом режим, скорость вращения подложкодержателя задавался, как 16 часов один оборот. При осаждении композиционного слоя в вакуумную камеру циклически через 45 секунд в течении 15 секунд подавался кислород. Принятые специальные меры по оптимизации переходных

процессов позволили добиться времени установления давления активного газа после включения клапана 4 секунды и времени откачки камеры при выключении клапана 8 секунд, что удовлетворяло условиям поставленной задачи сформировать многослойную пленку композита, где слой $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ полученный в атмосфере инертного газа чередовался с прослойкой осажденной в среде $\text{Ar} + \text{O}_2$ (см. рис. 1). По скорости и времени напыления композитов были сделаны оценки толщины слоев многослойной структуры, которые составили для прослойки композитов, осажденных в атмосфере аргона 8 - 14 нм и в смешанной атмосфере аргона + кислорода 3 - 5 нм. в зависимости от положения участка подложки относительно мишени.

Для выявления влияния окисленных прослоек на магнитодинамические свойства осажденной структуры также были получены образцы композитов с однослойной структурой (без добавления кислорода).

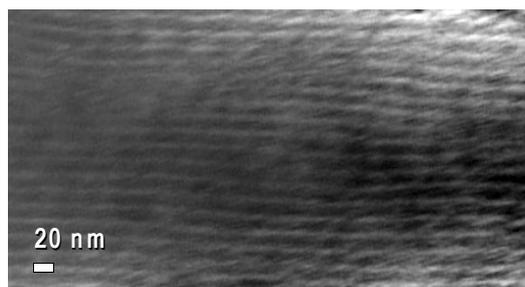


Рис. 1. Микрофотография поперечного разреза пленки многослойной структуры $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40} + \text{O}_2]\}_{176}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр и O_2 с давлением $2,4 \cdot 10^{-5}$ Торр) в течение 15 сек

После получения пленки композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{67,4}(\text{SiO}_2)_{32,6}$ или многослойных структур $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{67,4}(\text{SiO}_2)_{32,6}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{67,4}(\text{SiO}_2)_{32,6} + \text{O}_2]\}_{178}$ стеклотканное полотно раскраивалось на 4 заготовки размером $220 \times 220 \text{ мм}^2$ из которых путем проведения стандартных технологических приемов изготавливался образец конструкционного 4 слойного стеклотекстолита. В качестве существенных параметров технологического процесса можно выделить температуру и время полимеризации связующего составляющие $160 \text{ }^\circ\text{C}$ и 6 часов, соответственно и используемое эпоксидное связующее марки ЭНФБ. Структурными особенностями стеклоткани, которые оказывают влияние на магнит-

ные свойства пленки являются толщина стеклонитей и шаг плетения ткани, которые по нашим оценкам (см. рис.2) составили 7 и 500 мкм, соответственно.

Параметры полученных структур сведены в таблице. Элементный состав пленок проводили энергодисперсионной рентгеновской приставкой Oxford INCA Energy 250 на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380 LV.

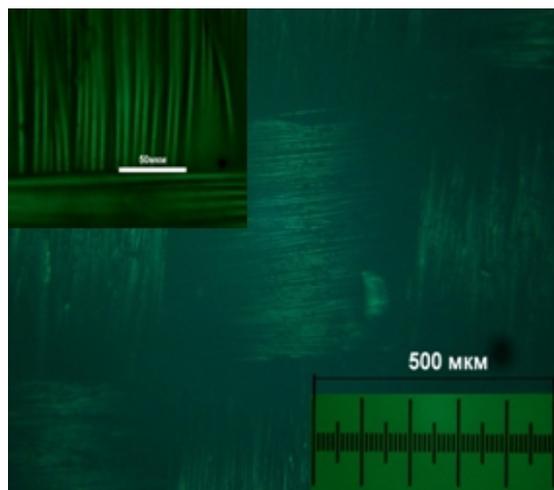


Рис. 2. Микроскопические фотографии подложки из стеклоткани

Параметры получения образцов

№	Пленка	P_{O_2} , Тор.	P_{Ar} , Тор.	$t_{нап}$, мин	$t_{вкл. O_2}$, сек	$t_{выкл. O_2}$, сек	вра ш., час/обр	$h_{слоя}$, мкм	n
1	$\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{67,4}(SiO_2)_{32,6}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{67,4}(SiO_2)_{32,6}+O_2]\}_{178}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	600	15	45	16 час/обр	2,3	4
2	$\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{67,4}(SiO_2)_{32,6}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{67,4}(SiO_2)_{32,6}+O_2]\}_{178}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	600	15	45	16 час/обр	1,69	4
3	$(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{67,4}(SiO_2)_{32,6}$		$6 \cdot 10^{-4}$	630			16 час/обр	1,96	4

$h_{слоя}$, мкм – толщина пленки, n – число слоев стеклоткани в стеклотекстолите.

Кривые намагничивания были получены на вибрационном магнитометре. Измерение комплексной магнитной проницаемости осуществлялось резонансным на частоте 0,2-10 ГГц в полуволновом коаксиальном резонаторе. Поглощение электромагнитного излучения (L) в СВЧ-диапазоне были измерены рупорным методом в частотном диапазоне от 2 до 37 ГГц.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Для установления влияния структуры подложки на процессы намагничивания пленки были измерены кривые намагничивания компо-

зита $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{67,4}(SiO_2)_{32,6}$. Измерения проводились в двух ортогональных направлениях в плоскости подложки.

Как видно из кривой намагничивания композит $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{65}(SiO_2)_{35}$ является ферромагнитным гетерогенным материалом с значением коэрцитивной силы ~ 16 Э. Поле выхода намагниченности в насыщение происходит при внешних полях ~ 500 Э. Кривая характеризуется также заметным изменением магнитной проницаемости в зависимости от внешнего поля в процессе намагничивания и отсутствием заметной магнитной анизотропии в плоскости пленки. Возможно, это связано с анизотропией формы внесенной структурой поверхности стеклоткани (рис. 3).

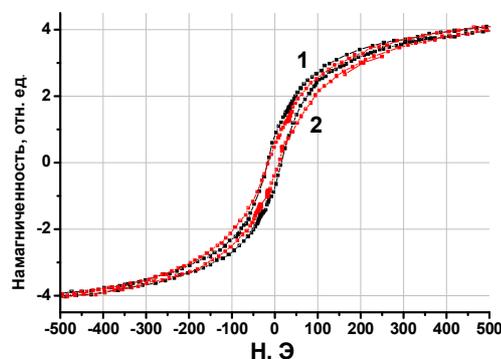


Рис. 3. Кривые намагничивания композита $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{65}(SiO_2)_{35}$, нанесенного на стеклоткань и измеренные в плоскости пленки 1 – вдоль оси образца; 2 – перпендикулярно оси

Для подтверждения нашего предположения стеклоткань была разделена на отдельные волокна и намагниченность измерялась вдоль и поперек волокон (рис. 4).

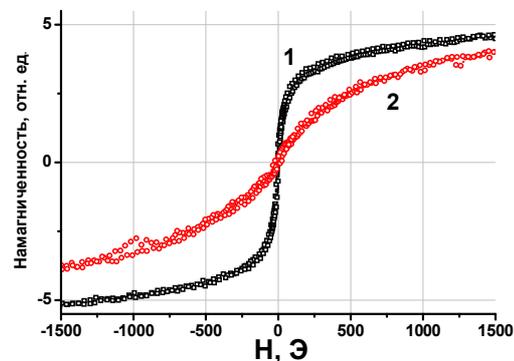


Рис. 4. Кривые намагничивания композита $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{65}(SiO_2)_{35}$ 1 – вдоль стекловолокна; 2 – перпендикулярно стекловолокну

Видно наличие существенной магнитной анизотропии. Она формируется геометрией пленки на стеклянных нитях длиной 500 мкм

и диаметром 7 мкм. Поле выхода намагниченности в насыщение вдоль волокон ~ 39 Э, поперек ~ 500 Э.

Если принять намагниченность насыщения сплава $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$ как 1,6 Т [30], то $4\pi M_s$ композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35} \sim 0,8$ Т, тогда исходя из приведенных выше полей анизотропии частота естественного магнитного резонанса для пленок может быть оценена из выражения 2

$$f_{\text{рез}} = 2\pi\nu \sqrt{H_a 4\pi M_s}, \quad (2)$$

где ν - гиромантическое отношение ($2\pi\nu = 2.8$ МГц/Э); H_a - поле плоскостной анизотропии, соответственно; M_s - намагниченность насыщения. Результаты расчетов дают для $H_a=39$ Э $f_{\text{рез}}=1,5$ ГГц, а для $H_a=500$ Э $f_{\text{рез}}=5,6$ ГГц.

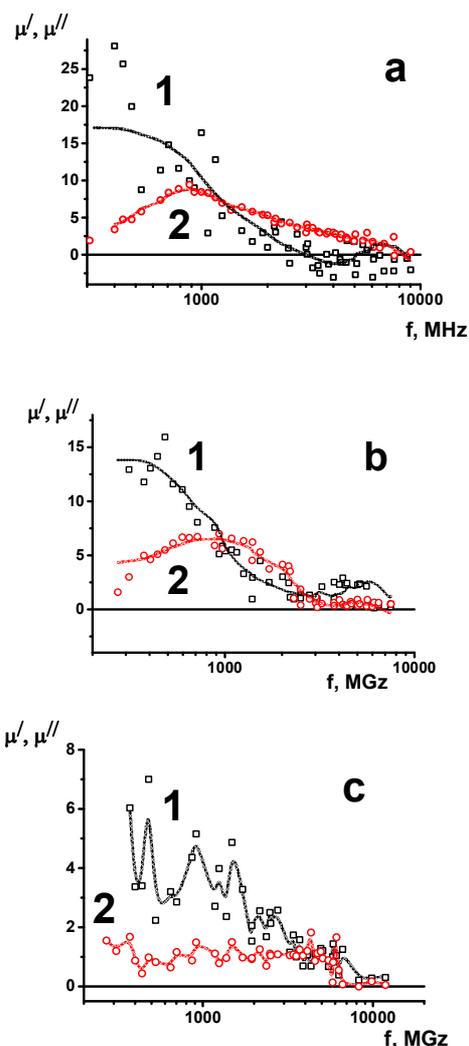


Рис. 5. Частотная зависимость μ' (кривая 1) и μ'' (кривая 2) для композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ нанесенного на стеклоткань (а), стеклонити вдоль волокна (б) и стеклонити поперек волокна (с)

На рис. 5 приведены измерения частотной зависимости действительной (μ') и мнимой (μ'') частей комплексной магнитной проницаемости пленок композита нанесенной на стеклоткань.

Как и в случае намагниченности измерения проводились на полотне и на стеклонитях вдоль и поперек волокна. Видно, что оценки частот естественного ферромагнитного резонанса в зависимости от ориентации магнитной пленки на стекловолкнах согласуются с экспериментальными зависимостями (рис.5).

Кривые намагниченности пленок многослойной структуры композит – композит нанесенные на стеклоткань (рис. 6 и 7) по основным параметрам похожи на характеристики однослойных гетерогенных покрытия (рис.3).

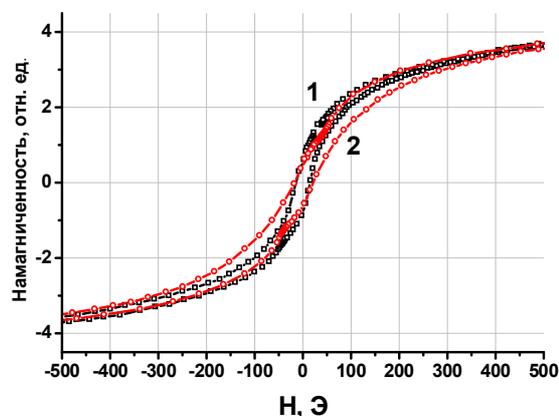


Рис. 6. Кривые намагничивания многослойной структуры № 1 нанесенной на стеклоткань и измеренные в плоскости пленки 1 – вдоль оси образца; 2 – перпендикулярно оси образца

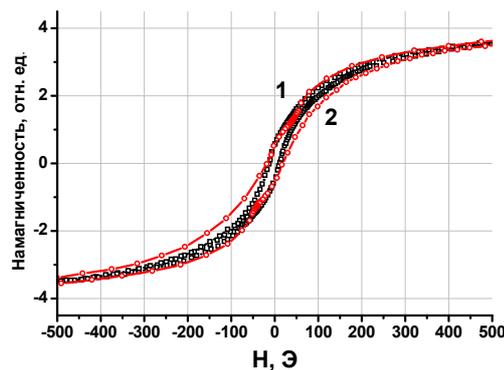


Рис. 7. Кривые намагничивания многослойной структуры № 2 нанесенной на стеклоткань и измеренные в плоскости пленки 1 – вдоль оси образца; 2 – перпендикулярно оси образца

Это подтверждает наше предположение, что магнитостатические параметры магнитомягких гомогенных и многослойных композиционных тонкопленочных покрытий в случае нанесения

на стеклоткань определяется структурой поверхности подложки.

Магнитодинамические свойства таких покрытий также в основных чертах не зависят от параметров материала, если последние удовлетворяют комплексу требований работы на данных частотах, а определяются структурой подложки рис. 8-9.

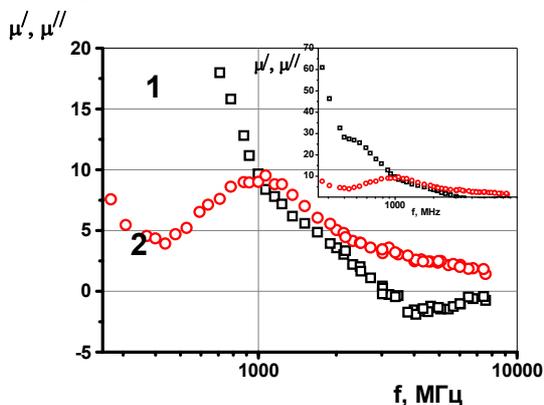


Рис. 8. Частотная зависимость μ' (кривая 1) и μ'' (кривая 2) многослойной структуры № 1 нанесенной на стеклоткань

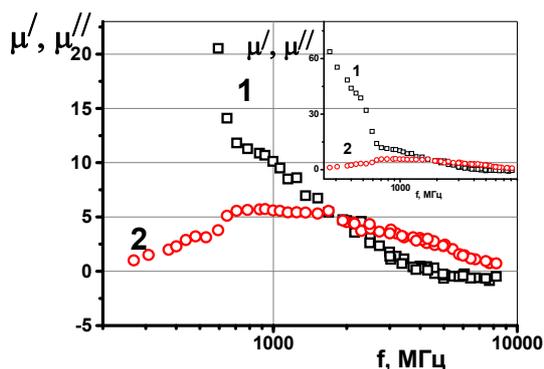


Рис. 9. Частотная зависимость μ' (кривая 1) и μ'' (кривая 2) многослойной структуры № 2 нанесенной на стеклоткань

Основным параметром, определяющий качество исследуемого материала является его способность поглощать электромагнитные излучения (L). Для синтезированных образцов были исследованы частотные зависимости поглощения электромагнитного излучения рупорным методом (рис. 10) в диапазоне частот от 2 до 37 ГГц.

Результаты измерения L различных образцов показаны на рисунке 11. Анализ приведенных зависимостей показывает, что среда, где нанокomпозиционная пленка, распределена на поверхности стеклоткани не имеет высокого значения коэффициента отражения (R), в отличие от пленки на гладкой поверхности.

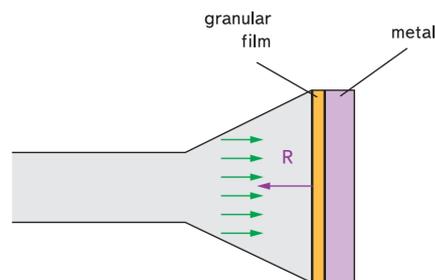


Рис. 10. Рупорный метод для измерения в частотных диапазонах 2–37 ГГц

Образцы имеют значительное поглощение на частотах выше 15 ГГц. Это находится в явном противоречии с магнитодинамическими характеристиками, приведенными в работе.

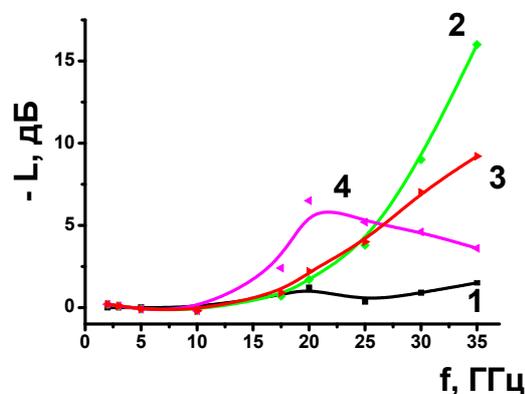


Рис. 11. Частотные зависимости коэффициента поглощения кривая 1 - стеклотекстолит, кривая 2 – образец № 3, кривая 3 – образец № 2, кривая 4 – образец № 1

Обращает на себя внимание также факт явного уменьшения степени поглощения стеклокомпозиционной структуры на частотах выше 25 ГГц с увеличением давления кислородной компоненты в рабочем газе при напылении окисленных прослоек и как следствие возрастание удельного электрического сопротивления структуры. При этом также понижается частота максимума на кривой $L(f)$. Из данных экспериментальных фактов можно предположить, что в данном частотном диапазоне основным механизмом поглощения электромагнитных излучений для пленок композита $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{65}(SiO_2)_{35}$ и многослойных структур композит-композит является мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости.

4. Заключение

Методом ионнолучевого распыления осаждены пленки композита $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{65}(SiO_2)_{35}$ в инертной среде и при циклическом добавлении кислорода с различным порционным дав-

лением на стеклоткань. Анализ кривых намагниченности пленок показал, что структура подложки определяет магнитостатические свойства пленки. В частности, высокая величина магнитной анизотропии (~ 500 Э) пленки поперек волокон ткани задается формой стеклонити, имеющей длину до 500 мкм при диаметре нити 7 мкм. Выявлено, что частотные зависимости комплексной магнитной проницаемости фрагментированной на поверхности стеклоткани пленки являются суперпозицией характеристик анизотропных фрагментов пленки, расположенных вдоль и поперек измерительного магнитного поля. Апробированный в работе подход позволил иметь значительную величину μ'' образцов вплоть до частоты 6-7 ГГц. Измеренные частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения стеклотекстолита, изготовленного из стеклоткани с напыленной на поверхность гетерогенной пленкой, показали значительную величину L в частотном диапазоне от 15 до 37 ГГц. Выявлено, что вид зависимости $L(f)$ зависит от параметров осажденной гетерогенной пленки.

Литература

- High frequency magnetic properties in metal-nonmetal granular films / S. H. Ohnuma, H. Fujimori, S. Mitani, T. Masumoto // *J. Appl. Phys.*- 1996.-V.79.-P.5130-5135.
- Bloemen, P. J. H. On the frequency dependence of the magnetic permeability of FeHfO thin films / P. J. H. Bloemen, B. Rulken // *J. Appl. Phys.*-1998.-V.84.P6778-6781.
- Study on mechanism of soft magnetic properties for high-frequency application in Ni₇₅Fe₂₅-SiO₂ granular films/ Ge Shihui, Yang Xiaolin, Kim Kwang Youn, Xi Li, Kou Xiaoming, Yao Dongsheng, Li Binsheng, Wang Xinwei // *Phys. Stat. Sol. A.*-2005.-V.202.-N.10.-P.2021-2027.
- Sohn J. C. Theoretical and experimental permeability spectra of nano-granular Co-Fe-Al-O films for GHz magnetoelastic device applications/ J.C. Sohn, D. J. Byun, S. H. Lim // *Phys. Stat. Sol. A.*-2004.-V.201.-N.8.-P.1946-1950.
- High-frequency magnetic permeability of nanocomposite film / N.A.Buznikov, I.T.Iakubov, A.L.Rakhmanov, A.O.Sboychakov // *J. Magn. and Magn. Mater.*-2005.-V.293.-P.938-946.
- Magnetostriction and soft magnetic properties of (Co_{1-x}Fe_x)-Al-O granular films with high electrical resistivity / S. Ohnuma, N. Kobayashi, T. Masumoto, S. Mitani, H. Fujimori // *J. Appl. Phys.*-1999.-V.85.-P.4574-4576.
- Xu Y. Microstructure and magnetic properties of percolating (Ni-Fe)_x(SiO₂)_{1-x} granular films / Y. Xu, X. Yan // *J. Mat. Rsch.*-1996.-V.11-P.2506-2509.
- Microstructure and magnetoresistance of Fe-Hf-O films with high electrical resistivity / Y. Hayakawa, N. Hasegawa, A. Makino, S. Mitani, H. Fujimori // *J. Magn. Mater.*-1996.-V.154.-P.175-182.
- Microstructures and magnetic properties of Co-Al-O granular thin films/ H. Ohnuma, K. Hono, H. Onoder, S. Ohnuma, H. Fujimori, J.S. Pedersen // *J. Appl. Phys.*-2000.-V.87-N.2-P.817-823.
- Particle size influence to the microwave properties of iron based magnetic particulate composites / L.Z.Wu, J.Ding, H.B.Jiang, L.F.Chen, C.K.Ong // *J. Magn. and Magn. Mat.*-2005.-V.285-P.233-239.
- Magnetic properties of metallic ferromagnetic nanoparticle composites/ R.Ramprasad, P.Zurcher, M.Petras, M.Miller, P.Renaud // *Appl. Phys.*-2004.-V.96.-N.11.-P.519-529.
- Chen C. Particle size effects and surface anisotropy in Fe-based granular films / C.Chen, O.Kitakami, Y.Shimada // *J. Appl. Phys.*- V. 84.-P. 2184-2189.
- Percolation and microwave characteristics of CoFeB-SiO₂ nano-granular films / Deng Lianwen, Feng Zekun, Jianjun Jiang, He Huahui // *J. Magn. and Magn. Mater.*-2007.-V.309.-P.285-289.
- Ferromagnetic resonance studies on (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_{1-x} granular magnetic films / F.Yildiz, S.Kazan, B.Aktas, S.I.Tarapov, L.Tagirov, A.B.Granovsky // *J. Magn. and Magn. Mater.*-2006.-V.305.-P.24-27.
- Morikawa T., Soft-magnetic properties of Co-Cr-O granular films / T.Morikawa, M.Suzuki, Y.Tagu // *J. Appl. Phys.*-1998.-V.83-P.6664-6666.
- FeCo-Zr-O nanogranular soft-magnetic thin films with a high magnetic flux density / S.Ohnuma, H.Fujimori, T.Masumoto, X. Y.Xiong, D. H.Ping, K.Hono // *Appl. Phys. Lett.*-2003.-V.82.-N.6.-P.946-948.
- Evaporatively deposited Co-MgF₂ granular materials for thin-film inductors / K. D.Coonley, G. J.Mehas, C. R.Sullivan, U. J.Gibson // M.S. thesis, Dartmouth College, 1999.
- Randhir Soft magnetic granular material Co-Fe-Hf-O for micromagnetic device applications / Li Liangliang, M.Crawford Ankur, X.Wang Shan, Ann F.Marshall, Mao Ming, Schneider Thomas, Bubber // *J. Appl. Phys.*-2005.-V.97.-N.10.-P.907-910.
- The effective permeability of granular films / A.Grimes, M.Grimes // *IEEE Trans. Magn.*-1993.-V.29-N.6-P.4092-4094.
- High-frequency soft magnetic properties of nanocrystalline Fe-(Co)-Hf-O films with high electrical resistivity and their applications to micro DC-DC converter / Y.Sasaki, S.Morita, T.Hatanai, A.Makino, T.Sato, K.Yamasawa // *NSM.*-1997.-V.8.-P.1025-1029.
- Высокочастотные магнитные свойства композитов (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(C)_{100-x} [Текст] / А.А. Аброчкин, А.А. Алешников, Ю.Е.Калинин, А.В.Ситников, О.С.Тарасова // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* - 2012. - Т. 8 - № 11 - С. 71-76.
- Ситников А.В. Механизмы наведенной магнитной анизотропии в гранулированных нанокompозитах (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x} [Текст] / А.В.Ситников // *Альтернативная энергетика и экология.* - 2008. - № 8. - С. 31-37.
- Стогней О.В. Анизотропия аморфных наногранулированных композитов CoTaNb-SiO_n и CoFeB-SiO_n [Текст] / О.В.Стогней, А.В.Ситников // *ФТТ.*-2010.- Т. 52. - Вып. 12.- С. 2356-2364.
- Ситников А.В. Магнитные свойства и особенности формирования структуры наногранулированных композитов металл-диэлектрик [Текст] / А.В.Ситников // *Материаловедение.* - 2010 - №3 - С. 134-137.
- Высокочастотные свойства многослойных систем на основе нанокompозитов (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x} и (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{100-x} [Текст] / А.А.Алешников, Ю.Е.Калинин, А.В.Ситников, О.С.Тарасова // *Перспективные материалы.* - 2015. - № 5. - С. 42-49.
- Структура и электрические свойства многослойных пленок на основе композитов ферромагнетик-

диэлектрик [Текст] / Х.С.М. Аль Аззави, К.Г. Королев, В.А. Макагонов, А.В. Ситников, О.С. Тарасова //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. - Т.11 - № 5 - С. 100-107.

27. Высоочастотные магнитные свойства многослойных гетерогенных пленок на основе нанокompозитов ферромагнитный металл-диэлектрик [Текст] / Х.С.М.Аль Аззави, К.Г.Королев, В.А.Макагонов, А.В.Ситников, О.С.Тарасова //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. - Т. 11 - № 5 - С. 112-118.

28. Высоочастотные свойства многослойных систем на основе нанокompозитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$

[Текст] / А.А. Алешников, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.С.Тарасова //Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. - Т. 9 - № 6-1 - С. 71-76.

29. Гранулированные нанокompозиты металл-диэлектрик с аморфной структурой [Текст] / Ю.Е. Калинин, А.Т. Пономаренко, А.В. Ситников, О.В.Стогней // Физика и химия обработки материалов. – 2001. - № 5 - С. 14-20.

30. Teruo Bitoh1 Materials Origin of low coercivity of Fe-(Al, Ga)-(P, C, B, Si, Ge) bulk glassy alloys/ Teruo Bitoh1, Akihiro Makino, Akihisa Inoue Materials //Transactions. – 2003. - V. 44. - N. 10 - P. 2020 – 2024.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Воронежский государственный технический университет

MAGNETOSTATIC AND MAGNETODYNAMIC PROPERTIES OF MULTILAYER SYSTEMS BASED ON NANOCOMPONENTS $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

A.B. Granovsky, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Moscow State University, Moscow, Russian Federation, e-mail: gran60@mail.ru

Yu.E. Kalinin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: Kalinin48@mail.ru

A.V. Sitnikov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sitnikov04@mail.ru

O.S. Tarasova, graduate student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: oksanchik2603@mail.ru

V.V. Filippov, master, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: : lonesome-wolf1994@mail.ru

The films of composites $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ were obtained by ion-beam sputtering method on the fiberglass, in an inert atmosphere and adding cyclic oxygen with different partial pressure. Analysis of the magnetization films showed that the structure of the substrate determines the magnetostatic properties of the film. Particularly, a high value of magnetic anisotropy of films (~ 500 Oe) is given across the fabric fibers from glass fiber having a length of up to 500 microns in diameter yarns 7 microns. It was revealed that the frequency dependence of complex magnetic permeability of the fragmented glass on the surface of the film are a superposition of the characteristics of the anisotropic film fragments along and across the measurement of the magnetic field. Approved in the work approach allowed to have a significant amount μ'' samples up to a frequency of 6-7 GHz. The measured frequency dependence of the absorption of electromagnetic radiation fiberglass, with a sprayed on the surface of a heterogeneous film, showed a considerable amount of L in the frequency range from 15 to 37 GHz. It was revealed that the dependence of L (f) depends on the parameters of the deposited heterogeneous films

Key words: nanocomposites, electrical properties, heterogeneous multilayer structure, specific electrical resistance

References

1. Ohnuma S. H., Fujimori H., Mitani S., and Masumoto T. High frequency magnetic properties in metal-nonmetal granular films// J. Appl. Phys.- 1996.-V.79.-P.5130-5135.
2. Bloemen P. J. H. and Rulkens B. On the frequency dependence of the magnetic permeability of FeHfO thin films // J. Appl. Phys.-1998.-V.84.P6778-6781.
3. Shihui Ge, Yang Xiaolin, Kim Kwang Youn, Xi Li, Kou Xiaoming, Yao Dongsheng, Li Binsheng, and Wang Xinwei Study on mechanism of soft magnetic properties for high-frequency application in Ni75Fe25–SiO2 granular films// Phys. Stat. Sol. A.-2005.-V.202.-N.10.-P.2021–2027.
4. Sohn J. C., Byun D. J., and Lim S. H. Theoretical and experimental permeability spectra of nano-granular Co–Fe–Al–O films for GHz magnetoelastic device applications// Phys. Stat. Sol. A.-2004.-V.201.-N.8.-P.1946–1950.
5. Buznikov N.A., Iakubov I.T., Rakhmanov A.L., Sboychakov A.O.High-frequency magnetic permeability of nanocomposite film// J. Magn. and Magn. Mater.-2005.-V.293.-P.938–946.
6. Ohnuma S., Kobayashi N., Masumoto T., Mitani S., and Fujimori H., Magnetostriction and soft magnetic properties of $(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)\text{-Al-O}$ granular films with high electrical resistivity // J. Appl. Phys.-1999.-V.85.-P.4574-4576.
7. Xu Y., and Yan X. Microstructure and magnetic properties of percolating $(\text{Ni-Fe})_x(\text{SiO}_2)_{1-x}$ granular films// J. Mat. Rsch.-1996.-V.11-P.2506-2509.
8. Hayakawa Y., Hasegawa N., Makino A., Mitani S., and Fujimori H. Microstructure and magnetoresistance of Fe–Hf–O films with high electrical resistivity // J. Magn. Mater.-1996.-V.154.-P.175-182.

9. Ohnuma H., Hono K., Onoder H., Ohnuma S., Fu-jimori H., Pedersen J.S. Microstructures and magnetic properties of Co-Al-O granular thin films// J. Appl. Phys.-2000.-V.87-N.2-P.817-823.
10. Wu L.Z., Ding J., Jiang H.B., Chen L.F., Ong C.K. Particle size influence to the microwave properties of iron based magnetic particulate composites//J. Magn. and Magn. Mat.-2005.-V.285-P.233-239.
11. Ramprasad R., Zurcher P., Petras M., Miller M., Renaud P. Magnetic properties of metallic ferromagnetic nanoparticle composites//Appl. Phys.-2004.-V.96.-N.11.-P.519-529.
12. Chen C., Kitakami O., and Shimada Y. Particle size effects and surface anisotropy in Fe-based granular films//J. Appl. Phys.-1998.- V. 84.-P. 2184-2189.
13. Lianwen Deng, Zekun Feng, Jianjun Jiang, Huahui He Percolation and microwave characteristics of CoFeB-SiO₂ nano-granular films//J. Magn. and Magn. Mater.-2007.-V.309.-P.285-289.
14. Yildiz F., Kazan S., Aktas B., Tarapov S.I., Tagirov L., Granovsky B. Ferromagnetic resonance studies on (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_{1-x} granular magnetic films//J. Magn. and Magn. Mater.-2006.-V.305.-P.24-27.
15. Morikawa T., Suzuki M., and Taga Y. Soft-magnetic properties of Co-Cr-O granular films//J. Appl. Phys.-1998.-V.83-P.6664-6666.
16. Ohnuma S., Fujimori H., and Masumoto T., Xiong X. Y., Ping D. H., and Hono K. FeCo-Zr-O nanogranular soft-magnetic thin films with a high magnetic flux density// Appl. Phys. Lett.-2003.-V.82.-N.6.-P.946-948.
17. Coonley K. D., Mehas G. J., Sullivan C. R., Gibson U. J. Evaporatively deposited Co-MgF₂ granular materials for thin-film inductors// M.S. thesis, Dartmouth College, 1999.
18. Li Liangliang, Crawford Ankur M., Wang Shan X., Marshall Ann F., Mao Ming, Schneider Thomas, and Bubber Randhir Soft magnetic granular material Co-Fe-Hf-O for micro-magnetic device applications//J. Appl. Phys.-2005.-V.97.-N.10.-P.907-910.
19. Grimes A., Grimes M. The effective permeability of granular films//IEEE Trans. Magn.-1993.-V.29-N.6-P.4092-4094.
20. Sasaki Y., Morita S., Hatanai T., Makino A., Sato T., and Yamasawa K. High-frequency soft magnetic properties of nanocrystalline Fe-(Co)-Hf-O films with high electrical resistivity and their applications to micro DC-DC converter// NSM.-1997.-V.8.-P.1025-1029.
21. Abrychkin A.A., Aleshnikov A.A., Kalinin Ju.E., Sitnikov A.V., Tarasova O.S. Vysokochastotnye magnitnye svojstva kompozitov (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)H(S)100-H [High-frequency magnetic properties of composites (Co₄₀Fe₄₀B₂₀) X (C) 100-X]//Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2012. - T. 8 - № 11 - S. 71-76.
22. Sitnikov A.V. Mehanizmy navedennoj magnitnoj anizotropii v granulirovannyh nanokompozitah (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)X(SiO₂)100-X [Mechanisms induced magnetic anisotropy in granular nanocomposites (Co₄₀Fe₄₀B₂₀) X (SiO₂) 100-X]//Alternativnaja jenergetika i jekologija. - 2008. - № 8. - S. 31-37.
23. Stognej O.V. Sitnikov A.V. Anizotropija amorfnih nanogranulirovannyh kompozitov CoTaNb-SiOn i CoFeB-SiOn [The anisotropy of amorphous composites nanogranulirovannyh CoTaNb-SiOn and CoFeB-SiOn]// FTT.-2010.- T. 52. - Vyp. 12.- S. 2356-2364.
24. Sitnikov A.V. Magnitnye svojstva i osobennosti formirovanija struktury nanogranulirovannyh kompozitov metall-dijelektrik [Magnetic properties and features of formation of structure nanogranulirovannyh composite metal-insulator]// Materialovedenie. – 2010 - №3 - S. 134-137.
25. Aleshnikov A.A., Kalinin Ju.E., Sitnikov A.V., Tarasova O.S. Vysokochastotnye svojstva mnogoslojnyh sistem na osnove nanokompozitov (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)X(SiO₂)100-X i (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)X(Al₂O₃)100-X [The high-frequency properties of multilayer systems based nanocomposites (Co₄₁Fe₃₉B₂₀) X (SiO₂) 100-X and (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀) X (Al₂O₃) 100-X]//Perspektivnye materialy. – 2015. - № 5. - S. 42-49.
26. Struktura i jelektricheskie svojstva mnogoslojnyh plenok na osnove kompozitov ferromagnetik-dijelektrik [Tekst] / H.S.M. Al' Azzavi, K.G.Korolev, Makagonov V.A., Sitnikov A.V., Tarasova O.S. [The structure and electrical properties of multilayer films based on-insulator composites ferromagnet]//Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015. - T.11 - № 5 - S. 100-107.
27. Al' Azzavi H.S.M., Korolev K.G., Makagonov V.A., Sitnikov A.V., Tarasova O.S. Vysokochastotnye magnitnye svojstva mnogoslojnyh geterogennyh plenok na osnove nanokompozitov ferromagnitnyj metall-dijelektrik [The high-frequency magnetic properties of heterogeneous multilayer films based on nanocomposites ferromagnetic metal-insulator]//Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2015. - T. 11 - № 5 - S. 112-118.
28. Aleshnikov A.A., Kalinin Ju.E., Sitnikov A.V., Tarasova O.S. Vysokochastotnye svojstva mnogoslojnyh sistem na osnove nanokompozitov (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)X(Al₂O₃)100-X [The high-frequency properties of multilayer systems based nanocomposites (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀) X (Al₂O₃) 100-X]//Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2013. - T. 9 - № 6-1 - S. 71-76.
29. Kalinin Ju.E., Ponomarenko A.T., Sitnikov A.V., Stognej O.V. Granulirovannye nanokompozity metall-dijelektrik s amorfnj strukturoj [Granular Nanocomposites metal-insulator with amorphous structure] // Fizika i himija obrabotki materialov. – 2001. - № 5 - C. 14-20.
30. Teruo Bitoh I, Akihiro Makino and Akihisa Inoue Materials Origin of low coercivity of Fe-(Al, Ga)-(P, C, B, Si, Ge) bulk glassy alloys//Transactions. – 2003. - V. 44. - N. 10 - P. 2020 – 2024.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК Si, Zr И Y НА СТРУКТУРУ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ГАЗОСЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК SnO₂

О.И. Ремизова, И.В. Бабкина, А.В. Ситников, Л.И. Янченко

В работе приводятся исследования структуры, электрических и газосенсорных свойств пленок SnO₂, легированных Si, Zr и Y. Образцы получены методом реактивного ионно-лучевого распыления. Показано, что добавление Si, Zr и Y способствует формированию аморфной структуры пленок. Нагрев пленок до 600 °С приводит к кристаллизации образцов. Наличие легирующих добавок уменьшает размеры кристаллитов в исследуемых пленках после кристаллизации до нескольких нанометров. Наибольшее значение относительного изменения сопротивления в среде, содержащей молекулы водорода, показали пленки SnO₂, легированные Y в количестве больше, чем 2 ат. %. Наличие твердых растворов SnO₂ - ZrO₂ стало причиной более высокого значения энергии активации носителей заряда в пленках Sn - Zr - O после кристаллизации образцов относительно других исследуемых пленок (Sn - Si - O, 3,9 ат. % Si E_a ≈ 0.05 эВ, Sn - Zr - O, 3,9 ат. % Zr E_a ≈ 0.5 эВ и Sn - Y - O, 4,8 ат. % Y E_a ≈ 0.11эВ). Все пленки оксида олова с добавлением кремния, циркония и иттрия показали значительную газовую чувствительность к водороду

Ключевые слова: полупроводники, тонкие пленки, оксид олова, электрические свойства, газовая чувствительность

Введение

Обычно в качестве функционального материала для резистивных газосенсорных устройств используют оксиды металлов. Наибольшее распространение получил широкозонный полупроводник SnO₂ [1-9]. Этот оксид имеет ширину запрещенной зоны (~3,5 эВ), что обеспечивает высокое значение удельного электрического сопротивления соединения в области рабочих температур (300 ÷ 400 °С) датчика. Как правило, в газовых сенсорных устройствах в качестве функционального вещества используется легированный поликристаллический SnO₂, в котором процесс электропереноса осуществляется по высокодефектному зернограничному слою. В этой связи, необходимо решить комплекс физико-технологических задач, таких как стабилизация кристаллической структуры, увеличение в объеме материала доли межзеренных границ, влияние на энергетические состояния электронов на поверхности раздела кристаллитов легирующих элементов и др. Перспективным видится переход от объемных материалов к тонкопленочным образцам, что позволяет повысить вклад в проводимость поверхностных состояний, возникающих на границах раздела подложка-пленка и пленка – газовая среда. Кроме того, появляется возможность через управляемую кристаллизацию аморфных соединений олова с различными аморфизирующими элементами достичь нанокристаллического размера зерен, а также стабилизировать поликристаллическую структуру. Некоторые легирующие элементы способны выступать в качестве катализаторов вза-

имодействия SnO₂ с активными газами, влиять на структурно-фазовый состав SnO₂ в зависимости от растворимости элемента, возможности образования новых фаз или полной нерастворимости атомов в оксиде олова.

Используя Si, Zr и Y, мы выявили влияние различных параметров легирующих элементов на свойства оксида олова. Так кремний является «классическим» аморфизатором и SiO₂ не образует с оксидом олова твердых растворов [10]. Цирконий, который может выступать в качестве катализатора при взаимодействии водорода с оксидом олова, используется для получения аморфных материалов и, в отличие от SiO₂, ZrO₂ в SnO₂ образует твердые растворы [10]. Окись циркония, являясь высокотемпературным соединением, препятствует росту зерен при кристаллизации и стабилизирует мелкодисперсную кристаллическую структуру. Итрий, как и цирконий, способен быть катализатором и препятствует росту размера зерен. Кроме того, в системе Y-Sn-O может образовываться соединение Y₂Sn₂O₇ [10]. Валентность легирующей примеси, когда последняя находится в позиции замещения, способна существенно влиять на плотность электронных состояний в полупроводнике. С этой точки зрения трехвалентный Y отличается от остальных рассматриваемых элементов.

1. Структура пленок и методика эксперимента

Методом ионно-лучевого распыления [2] были получены пленки исследуемых соединений. Осаждение проводилось из составной мишени на ситалловые подложки. Мишень представляла собой пластину олова размером 280x80 мм с навесками из легирующих материалов размером 80x10 мм. Благодаря неравномерному расположению навесок на поверхности мишени, в одном технологическом цикле получались образцы с непрерывным изменением состава пленки в зависимости от расположения подложки относительно мишени. В качестве рабочего газа использовался аргон. Кроме того, в вакуумную камеру вводился кислород при различных парциальных давлениях к рабочему газу для

Ремизова Оксана Ивановна – ВГТУ, ассистент, e-mail: oxana.remizova@gmail.com

Бабкина Ирина Владиславовна - ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: ivbabkina@mail.ru

Ситников Александр Викторович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sitnikov04@mail.ru

Янченко Лариса Ивановна - ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: lyanchenko74@yandex.ru

изменения степени окисления полученных соединений в процессе напыления. Толщина пленки исследуемых образцов менялась в пределах от 0,15 до 0,5 мкм.

Удельное электрическое сопротивление определялось потенциометрическим методом. Температурные зависимости сопротивления в пределах от 300 до 900 К исследовались в вакууме при давлении остаточных газов не хуже 10^{-4} Торр.

Чтобы определить состав композиционных пленок, использовали метод электроннозондового рентгеновского микроанализа. Состав определяли для пяти образцов, взятых с различных участков пленки. Затем пользовались полиномиальной экстраполяцией состава по длине подложки. Электронно-микроскопическим и рентгенографическим методами исследовали структурно-фазовый состав специально подготовленных образцов.

Рентгенодифракционный анализ выявил аморфную структуру во всех полученных образцах. После термической обработки $T = 600$ °С в течение 30 мин пленки кристаллизовались. Во всем диапазоне концентраций исследуемых соединений основной фазой является SnO_2 .

На рис. 1 в качестве примера приведена дифрактограмма пленок окиси олова, легированных кремнием концентрацией 3,9 ат. %, в исходном состоянии (1) и после отжига при $T = 600$ °С в течение 30 мин (2).

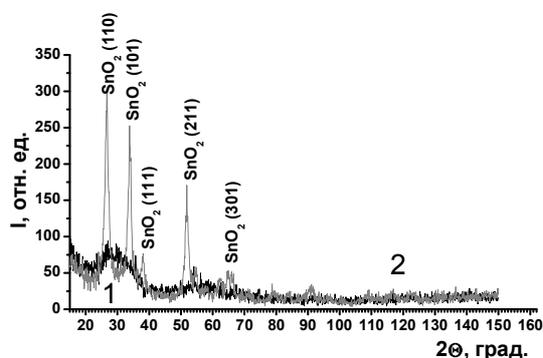


Рис. 1. Дифрактограммы, полученные на пленках окиси олова, легированных кремнием концентрацией 3,9 ат. %, в исходном состоянии (1) и после отжига при $T = 600$ °С в течение 30 мин (2).

Дифрактограмма образца в исходном состоянии характеризуется наличием двух широких диффузионных максимумов при $2\theta \approx 29$ и 58 град., что свидетельствует о рентгеноаморфной структуре исследуемой пленки. Все выявленные пики на дифрактограмме образца после термической обработки принадлежат SnO_2 . Аморфная структура в исходном состоянии соединения Sn-Si-O подтверждается также электроннографическими исследованиями [3, 4].

Для исследования влияния легирующих добавок на размер кристаллитов оксида олова после кристаллизации были исследованы пленки окиси олова с различной концентрацией кремния. Кри-

сталлические образцы были получены после отжига в течение 30 минут в атмосфере аргона при температуре 600 °С. Структура полученных образцов представлена на рис. 2. Наиболее крупные зерна, размер которых достигает значений 100 нм, наблюдаются в сплаве с минимальным содержанием кремния (рис. 2,а).

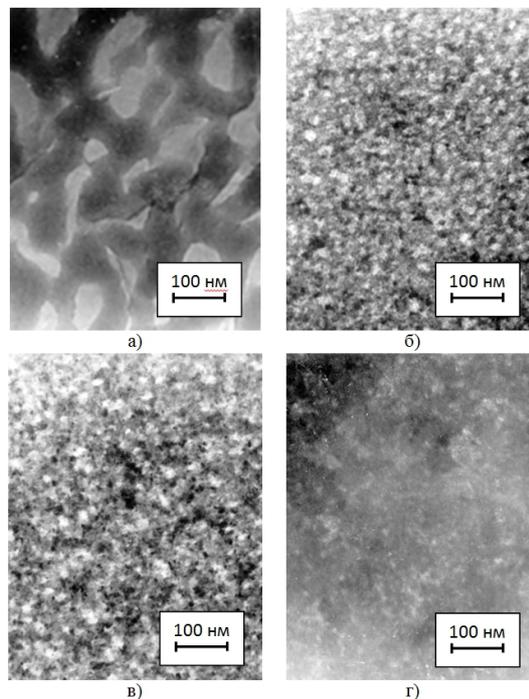


Рис. 2. Микрофотографии пленок окиси олова с различным содержанием кремния: а – 0,6; б – 2,6; в – 3,0; г – 3,9 ат. %, после отжига при $T = 600$ °С в течение 30 мин

С увеличением содержания кремния в результате кристаллизации аморфной фазы в образцах формируется мелкозернистая структура. В образцах с наибольшим содержанием кремния формируются самые мелкие (менее 5 нм) зерна (рис. 2,г).

При исследовании структуры образцов Sn-Zr-O были получены аналогичные результаты [12]. При увеличении содержания в окиси олова циркония от 0,5 до 4,6 ат. % установлено изменение размера зерен от 40 до 10 нм.

2. Электрические свойства

С целью выявления влияния легирующих добавок на электрические свойства пленок SnO_2 и их стабильность были получены температурные зависимости сопротивления пленок с различным содержанием кремния, циркония и иттрия. На рис. 3 приведены зависимости сопротивления от температуры для окиси олова с максимальным содержанием примесей.

В аморфном состоянии все исследуемые образцы при комнатной температуре обладали высоким сопротивлением, поскольку примесные уровни в полупроводниках с аморфной структурой расположены в середине запрещенной зоны.

Наблюдаемые на рис. 3 различия в сопротивлении аморфных образцов, возможно, связаны с разной концентрацией локализованных состояний электронов вблизи уровня Ферми или с изменением ширины запрещенной зоны. Наличие соединения $Y_2Sn_2O_7$ может привести к образованию ближнего атомного упорядочения в структуре окиси олова вблизи атома Y, менее дефектной по сравнению со структурой вокруг атомов Si, окислы которого не образуют твердых растворов с оксидом олова. Это может привести к более низкому удельному сопротивлению в пленках Y-Sn-O.

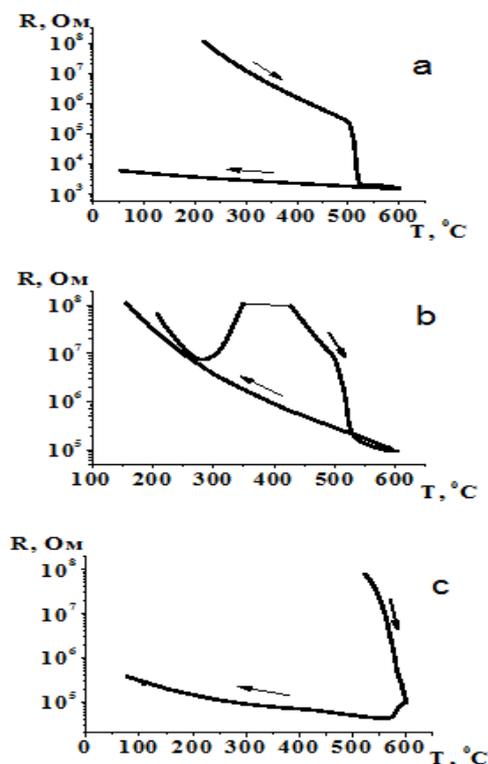


Рис. 3. Зависимость сопротивления от температуры: а - Sn-Si-O, 3,9 ат.% Si, б - Sn-Zr-O, 3,9 ат.% Zr и в - Sn-Y-O, 4,8 ат.% Y

Максимум на кривых $R(T)$ в образцах, легированных Zr, может быть связан с процессом перераспределения атомов кислорода в пределах аморфной фазы Zr-Sn-O. Это предположение согласуется с сообщением [12], где наблюдали при 300°C разрушение оксидной пленки на поверхности циркония, и после этого материал активно взаимодействовал с кислородом, образуя объемный оксид циркония.

Процесс кристаллизации аморфной структуры пленок приводит к резкому понижению сопротивления на зависимостях $R(T)$. Для всех исследуемых пленок увеличение количества легирующей примеси привело к повышению температуры кристаллизации. Наибольшее влияние на температуру кристаллизации окиси олова оказывает изменение содержания иттрия. Возможно, это связано с образованием химического соединения с оксидом олова.

Значительное понижение величины удельного электрического сопротивления после кристаллизации связано с формированием мелких примесных уровней электронов на поверхности пленки, границах раздела и в объеме кристаллитов SnO_2 . Энергию активации процесса электропереноса в исследуемых образцах после отжига оценивали по температурной зависимости сопротивления в координатах $\ln R - 1/T$. Для окиси олова с 3,9 ат.% кремния $E_a \approx 0.05$ эВ, для окиси олова с 3,9 ат.% циркония $E_a \approx 0.5$ эВ и для окиси олова с 4,8 ат.% иттрия $E_a \approx 0.11$ эВ. Можно предположить, что процесс электропереноса в исследуемых пленках, так же как и в поликристаллическом SnO_2 , определяется межзеренными границами. Наибольшая величина энергии активации в образцах с цирконием, возможно, связана с образованием в Sn-Zr-O твердого раствора замещения, что приводит к закреплению атомов циркония в объеме кристаллитов. Кремний и иттрий не образуют с окисью олова твердых растворов и могут образовывать дефекты, концентрируясь в межзеренном пространстве.

3. Газовая чувствительность

Большое влияние на удельное электрическое сопротивление исследуемых нанокристаллических образцов оказывал состав газовой среды. Проводились измерения относительного электрического сопротивления пленок Sn-Si-O, Sn-Zr-O и Sn-Y-O в атмосфере аргона с давлением $P = 380$ Торр и при добавлении в инертную среду водорода $P = 7,6$ Торр при различных температурах.

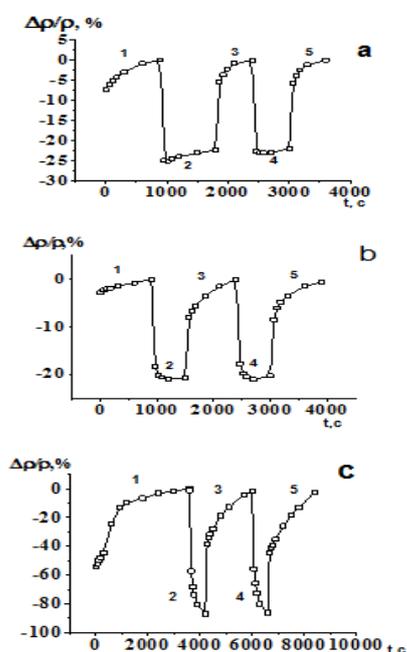


Рис. 4. Изменение относительного электрического сопротивления нанокристаллических пленок с течением времени: а - $Sn_{31}Si_{3,9}O_{67,5}$, б - $Sn_{31}Zr_{3,9}O_{67,5}$ и в - $Sn_{31}Y_{4,7}O_{67,5}$ (с). $T = 350^\circ\text{C}$: 1) при напуске аргона с давлением $P = 380$ Торр (участки 1, 3, 5); 2) при напуске аргона ($P = 380$ Торр) и водорода ($P = 7,6$ Торр) (участки 2 и 4)

На рис. 4 представлено изменение относительного электрического сопротивления нанокристаллических пленок $\text{Sn}_{31}\text{Si}_{3,9}\text{O}_{67,5}$, $\text{Sn}_{31}\text{Zr}_{3,9}\text{O}_{67,5}$ и $\text{Sn}_{31}\text{Y}_{4,7}\text{O}_{67,5}$ в зависимости от состава газовой среды. Измерение проводилось при $T = 350^\circ\text{C}$ в атмосфере Ar и $\text{Ar} + \text{H}_2$.

При напуске водорода в аргоновую среду происходит резкое (< 1 мин) снижение удельного электрического сопротивления. В дальнейшем присутствие водорода слабо меняет величину удельного электрического сопротивления. При удалении водорода из инертной атмосферы в течение 10 мин происходит полное восстановление величины электрического сопротивления. При многократном повторении подобных циклов результаты полностью повторялись.

Данные по газовой чувствительности для различных концентраций кремния, циркония и иттрия приведены на рис. 5. Видно, что $\Delta\rho/\rho(x)$ зависит от вида легирующего элемента и его концентрации. Так для оксида олова, легированного кремнием, зависимость $\Delta\rho/\rho(x)$ имеет максимум при содержании кремния $\approx 2,5$ ат. %. Возможно, это связано с выделением по границам зерен оксида кремния. При малой концентрации кремний способствует увеличению дефектности межгранульного пространства, что увеличивает количество центров адсорбции водорода.

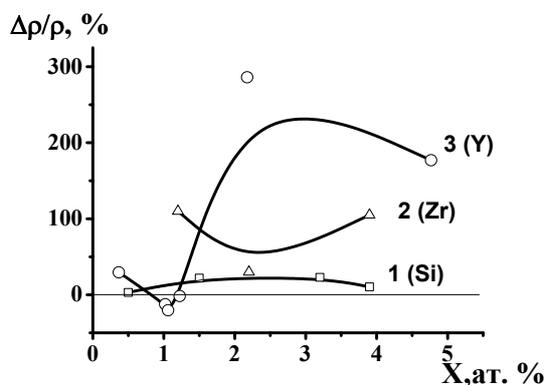


Рис. 5. Зависимости относительного изменения электрического сопротивления нанокристаллических пленок оксида олова от концентрации легирующих элементов: 1 - Sn-Si-O , 2 - Sn-Zr-O и 3 - Sn-Y-O в атмосфере аргона с давлением $P = 380$ Торр и водорода $P = 7,6$ Торр при $T = 350^\circ\text{C}$

Увеличение содержания Si приводит к росту сопротивления межзеренного пространства из-за скопления значительного количества SiO_2 и, как следствие, к уменьшению вклада в электроперенос межкристаллических границ.

В случае легирования оксида олова цирконием, зависимость газовой чувствительности от концентрации при содержании 2,2 ат. % циркония имеет минимум. Возможно, это связано с образованием твердого раствора $\text{SnO}_2\text{-ZrO}_2$. Поскольку ширина запрещенной зоны ZrO_2 равна $\sim 4,7\text{эВ}$, увеличение содержания циркония может привести к увеличе-

нию удельного электрического сопротивления оксида Sn-Zr-O , что снижает газовую чувствительность. С другой стороны, уменьшение размеров кристаллитов в пленке способствует увеличению вклада в проводимость структуры межкристаллического пространства, что увеличивает $\Delta\rho/\rho$. Вероятно, вид зависимости $\Delta\rho/\rho(x)$ определяется этими двумя процессами.

Наибольшей газовой чувствительностью обладают образцы системы Sn-Y-O . Увеличение сопротивления пленки в атмосфере водорода при малых концентрациях иттрия (~ 1 ат. %) может быть связано с тем, что иттрий может иметь переменную валентность, и при данной концентрации выступать в качестве акцептора в оксиде олова. При увеличении содержания иттрия в оксиде образуется соединение $\text{Y}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$, которое не влияет на тип носителей заряда в соединении, являясь отдельной фазой.

Выводы

Представленные выше результаты изучения структуры, электрических и газосенсорных свойств тонких пленок оксида олова, легированных кремнием, цирконием и иттрием, позволяют выявить некоторые закономерности. Так добавление к SnO_2 атомов Si , Zr и Y приводит к формированию аморфной структуры пленки оксида олова. При этом температура кристаллизации (T_k) повышается с увеличением концентрации легирующих атомов и Y повышает T_k в большей степени, чем другие добавки. Перераспределение атомов кислорода в пределах аморфной фазы в пленках оксида олова, легированных иттрием, может быть причиной увеличения сопротивления на зависимости $R(T)$ при температуре 400°C в процессе нагрева образца. Наличие твердых растворов $\text{SnO}_2\text{-ZrO}_2$ возможно стало причиной более высокого значения энергии активации проводимости пленок Sn-Zr-O после кристаллизации образцов, подвергнутых нагреву до 600°C , относительно других исследуемых пленок (Sn-Si-O , 3,9 ат. % Si $E_a \approx 0,05$ эВ, Sn-Zr-O , 3,9 ат. % Zr $E_a \approx 0,5$ эВ и Sn-Y-O , 4,8 ат. % Y $E_a \approx 0,11$ эВ). Все пленки оксида олова с добавлением кремния, циркония и иттрия показали значительную газовую чувствительность к водороду. Наибольшее значение относительного изменения сопротивления в среде, содержащей молекулы водорода, показали пленки SnO_2 , легированные Y в количестве больше 2 ат. %.

Литература

1. Кукуев, В.И. Микроструктура и электропроводность сенсорных слоев диоксида олова [Текст] / В.И. Кукуев, Е.С. Рембеза, Э.П. Домашевская // Перспективные материалы. - 2000. - № 3. - С. 42-48.
2. Формирование структуры газочувствительных слоев диоксида олова, полученных реактивным магнетронным распылением [Текст] / Р.М. Вожилова, Д.П. Димитров, Н.И. Долотов, А.Р. Кузьмин, А.В. Махин, В.А. Мошников, Ю.М. Таиров // Физика и техника полупроводников. - 1995. - Т. 29. - Вып. 11. - С. 1987-1993.

3. Gubbins, M.A. Nanostructural characterization of SnO₂ thin films prepared by reactive r.f. magnetron sputtering of tin [Текст] / M.A. Gubbins, V. Casey, S.B. Newcomb // *Thin solid films*. – 2002. – Vol. 405. – PP. 270 – 275.
4. Микроструктура и физические свойства тонких пленок SnO₂. [Текст] / С. И. Рембеза, Т.В. Свистова, Е.С. Рембеза, О.И. Борсякова // *Физика и техника полупроводников*. – 2001. – Т. 35. – Вып. 7. – С. 796-800.
5. Adamyan, A.Z. Preparation of SnO₂ films with thermally stable nanoparticles [Текст] / A.Z. Adamyan, Z.N. Adamian, V.M. Aroutiounian // *Sensors*. – 2003. – Vol. 3. – PP. 438 – 442.
6. Волькенштейн, Ф.Ф. Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции [Текст] / Ф.Ф. Волькенштейн. - М.: Наука, 1987. - 432 с.
7. Природа изменений физических свойств поликристаллических тонких пленок SnO₂, вызванных термообработкой. [Текст] / А.И. Ивашенко, И.В. Хорошун, Г.А. Киоссе, И.Ю. Мирончук, В.В. Попушой // *Кристаллография*. – 1997. – Т. 42. - № 5. - С. 901 – 905.
8. Неорганические структуры как материалы для газовых сенсоров. [Текст] / Р.Б. Васильев, Л.И. Рябова, М.Н. Румянцева, А.М. Гаськов // *Успехи химии*. – 2004. – Т. 73. - № 10. - С. 1020 – 1038.
9. Влияние водорода на электрические свойства пленок окислов металлов, легированных кремнием [Текст] / А.Л. Гусев, И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин, Л.Н. Коротков, О.И. Самохина, А.В. Ситников, Б.А. Спиридонов // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2002. - № 6. - С. 12 – 22.
10. Диаграммы состояния металлических систем, [Текст] / под ред. Н.В. Агеева, Л.А. Петровой. - М.: ВИНТИ, 1963. - 352 с.
11. Шматова, Ю.В. Электрофизические свойства нанокompозитов на основе в SnO₂:ZrO₂ и SnO₂ с добавлением многостенных углеродных нанотрубок [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук: защищена 27.05.01 : утв. 15.11.01. Воронеж, 2011 – 31 с.
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст] / Справочник: в 3-х томах под ред. Н.П. Лякишева. - Т.2. - М: Машиностроение. - 1997. – 1024 с.

Воронежский государственный технический университет

INFLUENCE OF Si, Zr AND Y DOPANTS ON STRUCTURE, ELECTRICAL AND GAS-SENSING PROPERTIES OF SnO₂ FILMS

O.I. Remizova, Assistant, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: oxana.remizova@gmail.com

I.V. Babkina, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ivbabkina@mail.ru

A.V. Sitnikov, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sitnikov04@mail.ru

L.I. Yanchenko, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Docent, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: lyanchenko74@yandex.ru

The work presents the study of the structure, electrical and gas-sensing properties of SnO₂ films doped by Si, Zr, and Y. The samples were obtained by reactive ion-beam sputtering. It is shown that the addition of Si, Zr, and Y leads to the formation of amorphous structure in the films. Heating the films up to 600 °C leads to the samples crystallization. The presence of the doped elements reduces crystallites size of the investigated films after crystallization down to a few nanometers. The highest value of the relative change of electrical resistance in hydrogen containing environment has been showed by the SnO₂ film containing more than 2 at. % of Y. The presence of solid solutions SnO₂ - ZrO₂ was the reason for the higher values of the activation energy of the charge carriers in the films of Sn - Zr - O after crystallization of samples studied in relation to other films (Sn - Si - O, 3,9 atomic % Si E_a ≈ 0.05 eV, Sn. - Zr - O, 3,9 atomic % Zr E_a ≈ 0.5 eV, and Sn - Y - O, 4,8 atomic% Y E_a ≈ 0.11eV). All the tin oxide film with the addition of silicon, zirconium and yttrium showed significant sensitivity to hydrogen gas

Key words: semiconductor, thin films, tin oxide, electrical properties, gas sensitivity

References

1. V.I. Kukuev, E.S. Rembeza, Eh.P. Domashevskaya. Mikrostruktura i ehlektroprovodnost' sensoryh sloev dioksida olova [Microstructure and electrical conductivity of sensor layers of tin dioxide]. *Perspektivnye materialy*, № 3, 2000, s. 42-48
2. R.M. Voshchilova, D.P. Dimitrov, N.I. Dolotov, A.R. Kuz'min, A.V. Mahin, V.A. Moshnikov, Yu.M. Tairov. Formirovanie struktury gazochuvstvitel'nyh sloev dioksida olova, poluchennyh reaktivnym magne-tronnym raspyleniem. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Formation of the structure of gas-sensitive tin dioxide layer obtained by reactive magnetron sputtering]. 1995, tom 29, vyp. 11, s. 1987 -1993
3. M.A. Gubbins, V. Casey, S.B. Newcomb. Nanostructural characterization of SnO₂ thin films prepared by reactive r.f. magnetron sputtering of tin. *Thin solid films*, 405 (2002), pp. 270 – 275

4. Rembeza S. I., Svistova T. V., Rembeza E. S., Borsyakova O.I. Mikrostruktura i fizicheskie svojstva tonkih plenok SnO₂ [The microstructure and the physical properties of thin films of SnO₂]. Fizika i tekhnika poluprovodnikov, 2001, tom 35, vyp. 7
5. A.Z. Adamyan, Z.N. Adamian, V.M. Aroutiounian. Preparation of SnO₂ films with thermally stable nanoparticles. Sensors, 2003, 3, pp. 438 – 442
6. Vol'kenshtejn F.F. Ehlektronnye processy na poverhnosti poluprovodnikov pri hemosorbicii [Electronic processes on the surface of the semiconductor in chemisorption]. M.: Nauka, 1987, 432 s.
7. A.I. Ivashchenko, I.V. Horoshun, G.A. Kiosse, I.YU. Mironchuk, V.V. Popushoj. Priroda izmenenij fizicheskikh svojstv polikristallicheskih tonkih ple-nok SnO₂, vyzvannyh termoobrabotkoj [Nature changes the physical properties of polycrystalline thin films of SnO₂, caused by the heat treatment]. Kristallografiya, 1997, tom 42, № 5, s. 901 – 905
8. Neorganicheskie struktury kak materialy dlya gazovyh sensorov [The inorganic structures as materials for gas sensors]. R.B. Vasil'ev, L.I. Ryabova, M.N. Romyanceva, A.M. Gas'kov, Uspekhi himii, 2004, 73 (10), s. 1020-1038
9. V.I. Kukuev, E.S. Rembeza, Eh.P. Domashevskaya. Mikrostruktura i ehlektroprovodnost' sensoryh sloev dioksida olova [Microstructure and electrical conductivity of sensor layers of tin dioxide]. Perspektivnye materialy, № 3, 2000, s. 42-48
10. Gusev A.L., Zolotuhin I.V., Kalinin Yu.E., Korotkov L.N., Samohina O.I., Sitnikov A.V., Spiri-donov B.A. Vliyanie vodoroda na ehlektricheskie svojstva plenok okislov metallov, legirovannyh kremniem [Effect of hydrogen on the electrical properties of metal oxide films, doped silicon]. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya», № 6, 2002. s. 12 – 22.
11. Diagrammy sostoyaniya metallicheskih system [Diagrams of metallic systems], opublikovannye v 1963 godu. VINITI, M., pod red. N.V. Ageeva, L.A. Petrovoj.
12. Shmatova Yu.V. Ehlektrofizicheskie svojstva nanokompozitov na osnove v SnO₂:ZrO₂ i SnO₂ s dobavleniem mnogostennyh uglerodnyh nanotrubok [Physical properties of nanocomposites based in SnO₂: ZrO₂ and SnO₂ with the addition of multi-walled carbon nanotubes]: Avto-referat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kan-didata tekhnicheskikh nauk. Voronezh, 2011
13. Diagrammy sostoyaniya dvojnnyh metallicheskih system [The diagrams of binary metallic systems]. Spravochnik: v 3-h tomah pod red. N.P. Lyakisheva. T.2. 1997, 1024s.

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 519.6+517.977.56

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

С.Л. Подвальный

Рассматривается проблема построения модели и управления одним или несколькими показателями качества на выходе технологического объекта в типичной постановке: искомым показателем недоступен для автоматического измерения, но имеется большое количество непрерывно измеряемых косвенных параметров в составе информационно-управляющей системы (ИУС). При этом необходимо построить модель косвенного контроля после предварительной редукции пространства измерений профессиональными и формально-вычислительными методами. Наиболее предпочтительными здесь оказались статистические регрессионные методы, на базе которых формируются двойные корреляционные фильтры. Для уменьшения динамической погрешности моделей косвенного контроля рассматриваются схемы эквивалентного запаздывания и скользящего среднего. Структура искомой модели формируется как аддитивная свертка по системе моделирующих функций с неизвестными коэффициентами, входящими в модель линейно. Дополнительная задача идентификации сводится к решению системы линейных уравнений (для квадратичного критерия) либо к задаче линейного программирования (для модульного критерия). Подробно рассмотрена структура погрешности искомой модели. Итоговая задача управления сводится к формированию линейной дискретной модели системы дифференциальных уравнений с адаптивной коррекцией в режиме реального времени в структуре с наблюдателем

Ключевые слова: косвенный контроль, статистические модели, матрицы регрессии, динамические погрешности, идентификация

1. Введение

Проблема построения моделей косвенного контроля была и остается важной в информационно-управляющих системах (ИУС), поскольку без оценки состава измерений в пространстве состояний невозможно проводить экспериментальные исследования, оптимально управлять сложным объектом (именно для него строятся ИУС) на всех уровнях управления: оперативном, тактическом или стратегическом [1].

Фактически все подсистемы общей ИУС требуют информации о параметрах объекта в пространстве состояний, полностью либо частично недоступных для измерения. К счастью мы при этом измеряем огромное количество параметров в разных точках объекта (вход, выход, промежуточные точки) и достаточно давно [2] возникла идея использования такой косвенной информации для оценки не измеряемых автоматически параметров. Решению этой задачи и посвящена настоящая статья.

2. Постановка задачи

Будем, без потери общности, рассматривать следующую структуру, которая характерна для задач управления качеством (см. [1-2]).

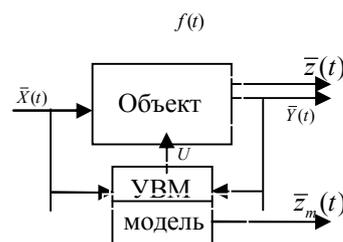


Рис. 1. Общая схема косвенного контроля.

Здесь нам через ИС доступны для измерения часть параметров на входе, выходе и в промежуточных точках, включая управление, т.е. пространство измерений

$$V(t) = \{\bar{x}(t), \bar{Y}(t), \bar{U}(t)\}. \quad (1)$$

Необходимо построить модель, которая с позиций некоторого критерия идентификация $J_{ид}$ была бы как можно ближе к недоступному для непосредственного контроля вектору состояний $\bar{Z}_{ист}(t)$. В частности это могут некоторые показатели качества, количество которых $[Z]$ обычно невелико – от 1 до 5.

Тогда искомая модель $\bar{Z}_m(t)$ должна давать оценку истинного значения $\bar{Z}(t)$ с некоторой погрешностью [2]:

$$\delta_z^2 = M(\bar{Z}_m - \bar{Z}(t))^2 \quad (2)$$

или иначе

$$\delta_z^2 = \delta_V^2 + \delta_{mod}^2, \quad (3)$$

где $\delta_V^2 = (\delta_X^2 + \delta_Y^2 + \delta_U^2) + \delta_{дин}^2$ – суммарная погрешность модели, которая обусловлена погрешностью вектора измерений и погрешностью, связанной с динамическими свойствами объекта: $\delta_{дин}^2$.

2.1. Особенности построения модели косвенного контроля

Для выбора измеряемого пространства необходимо предварительно провести профессиональный анализ.

Здесь количество параметров может быть частично уменьшено (до 25-30) либо изменено за счет экспертных профессиональных знаний (технолога, специалиста по управлению, менеджеров среднего звена).

Редукция пространства измерений

Обычно используется два подхода: 1) нелинейные функциональные преобразования; 2) статистическая линеаризация пространства измерений. Рассмотрим эти подходы отдельно, хотя, конечно, их можно использовать одновременно.

Идея функциональных преобразований сводится к тому, что предварительно вычисляются некоторые соотношения измеряемых параметров для последующего использования в модели. Формально, модель в пространстве таких “обобщенных” измерений будет содержать меньше переменных. Примеры таких функциональных соотношений:

$$z_1 = x_z / x_2; z_2 = c_1 x_1 / c_2 x_2; z_3 = \sum c_i x_i / \sum b_i x_i$$

Иногда используются для этих целей т.н. инварианты, которые известны в данной предметной области, например для механических систем часто используется такой показатель, как Re – число Рейнольдса:

$$Re = \frac{vd}{\mu}$$

где v – скорость, d – линейный размер, μ – вязкость (кинематическая).

Подобные инварианты известны в разных предметных областях (теплотехнике, химической технологии, электромеханике): Nu, Pe, Pr, Da ... и их использование было особенно характерно для “докомпьютерной” эры моделирования. В последнее время поиском таких соотношений стали вновь активно заниматься (синергетический подход) [3].

2.2. Статистический анализ объекта

Статистический анализ обычно проводят в одной из форм: - активный эксперимент для выявления параметров с наибольшим влиянием на искомый показатель в области его экстремального значения;

- пассивный эксперимент, для которого характерно длительное наблюдение за системой (объектом) без вмешательства в нормальный ход его функционирования.

На время статистического эксперимента необходимо организовать достаточно частое

измерение показателей качества. (Чаще чем обычно в 4-5 раз). Полученные данные обрабатываются статистическими методами и получаются математические ожидания, дисперсии и другие статистические характеристики. Важно правильно выбрать общее время T и интервал измерений:

$$T_{набл} = N * \Delta t$$

Обычно при пассивном эксперименте принято [2], чтобы размерность [N]=200-300 наблюдений.

Интервал наблюдений Δt обычно находится из корреляционных функций выходных координат.

Пусть $\bar{V}_{изм}[k] \in [\bar{X}[k], \bar{Y}[k], \bar{U}[k]]$ – это то, что определяет пространство измерений в k-тый момент времени. С использованием измеренных во время эксперимента $\bar{Z}[k]$ показателей качества с той же частотой измерения, вычисляем для всего множества наблюдений $k=1, N$ статистические характеристики. Если измеряется один показатель $\bar{Z}[k]$, то тогда:

1) Коэффициенты взаимной корреляции для Z и \bar{V} составляют вектор:

$$\bar{R}_{vz} = \{R_{ZV_1}, R_{ZV_2}, \dots, R_{ZV_m}\}^T = \{R_{Z_1}, R_{Z_2}, \dots, R_{Z_m}\}^T \quad (4)$$

2) Коэффициенты корреляции всех измерений $R_{V_i V_j}$ между собой составляют матрицу

$$\|R_{V_i V_j}\| = \|R_{ij}\|: \begin{matrix} \begin{matrix} R_{V_1 V_1} & R_{V_1 V_2} & \dots & R_{V_1 V_m} \\ R_{V_2 V_1} & R_{V_2 V_2} & \dots & R_{V_2 V_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{V_m V_1} & R_{V_m V_2} & \dots & R_{V_m V_m} \end{matrix} = \begin{matrix} \begin{matrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mm} \end{matrix} \end{matrix} \quad (5)$$

Редукция сводится к работе двух фильтров:

1-ый фильтр (убирает параметры V_i , слабо влияющие на искомый z) работает по следующему принципу:

- если $R_{ZV_j} \leq \min R_{ZV}$, то отбрасывается измеряемый параметр V_i . Обычно выбирают $\min R_{V_j} = 0.15 - 0.25$

2-ой фильтр (убирает дублирующие, сильно связанные между собой параметры) путем сравнения с порогом R_{ij}^* :

- если $R_{V_j V_i} \leq \max R_{V_j V_i}^*$, то отбрасывается тот из этой пары, который слабее влияет на z, т.е. тот для которого выполняется условие $R_{ZV_i} < R_{ZV_j}$.

Обычно $\max R_{V_j V_i} = 0.8 - 0.9$.

Эту процедуру повторяют несколько раз, варьируя значениями порогов обоих фильтров ($\min R_{ZV}$ и $\max R_{V_j V_i}$) до получения искомого результата: сокращения размерности [v] до 10-15. Далее переходим к следующему этапу - построению модели.

2.3. Форма модели косвенного контроля

Сформируем следующую постановку задачи.

В пространстве ограниченного количества измеряемых ИС параметров $\bar{V}_x[k]$ необходимо построить модель $Z_m[k]$ и для упрощения этой процедуры рассмотрим два вспомогательных вопроса: выбор структуры (формы) модели $Z_n[k] = \varphi[\bar{V}_x[k]]$

и критерия достоверности модели для последующей идентификации $J_{уд}$.

Каким бы ни был вид функции φ , её нужно сконструировать таким образом, чтобы неизвестные коэффициенты этой функции относительно \min критериев достоверности модели определялись простым путем.

$$\varphi(m) = \sum \alpha_j \varphi_j(m) // J_{уд} = \psi[(z_m - z), \bar{\alpha}] \Rightarrow \min_{\bar{\alpha}} J_{уд} \quad (6)$$

Чаще всего для этого используют суперпозицию типовых функций, например степенных:

$$Z_m = d_0 + \sum_i d_1 V_i + \sum_i d_2 V_i^2 + \sum_i \sum_j d_3 V_i V_j + \dots$$

Существует несколько возможных подходов к решению поставленной задачи в зависимости от типа критерия достоверности:

$$J_{уд}^{**} = \sum_{k=1}^N (Z^{\text{экс}}[k] - Z_m[k])^2 \quad (7)$$

Это так называемый метод наименьших квадратов; - неизвестный вектор $\bar{\alpha}$ определяется из решения вспомогательной системы линейных уравнений. В другом варианте [8-9] используется:

$$J_{уд}^{**} = \sum_{k=1}^N |Z^{\text{экс}}[k] - Z_m[k]| \quad (8)$$

Это т.н. модульный критерий; - неизвестный вектор $\bar{\alpha}$ определяется путем решения вспомогательной задачи линейного программирования.

Использование первого критерия $J_{уд}$ и формы модели $\varphi(\dots)$ по существу составляет основу хорошо известного метода наименьших квадратов. Задача построения модели осуществляется в цикле: линейная модель $\varphi(\dots)$, квадратичная, кубическая и т.д., пока не достигнем заданной точности:

$$\min J_{уд}(\bar{\alpha}) \leq J_{зад} \quad (9)$$

Продемонстрируем метод наименьших квадратов на простом примере. Пусть ищется модель типа полинома степени m .

$$Z_{\text{мод}} = \varphi(\bar{V}) = \sum_{i=1}^m \alpha_i V^i \quad (10)$$

$$J_{уд} = \sum_{k=1}^N (Z_i^{\text{экс}} - Z_{\text{мод}})^2 \quad (11)$$

Искомые коэффициенты полинома определяются из условия:

$$\min_{\alpha} \left\{ \sum_{i=1}^N \left(Z_i^{\text{экс}} - \sum_{j=1}^m \alpha_j V^j \right)^2 \right\} \quad (12)$$

Дифференцируя по α и приравнявая значения всех производных нулю, получим приведенную ниже систему линейных уравнений (13) (переобозначим $Z^{\text{зад}}_i = y_i; V_i = x_i$):

$$\begin{pmatrix} N \sum_{i=1}^N x_i \sum_i x_i^2 \dots \sum_i x_i^m \\ \sum_i x_i \sum_i x_i^2 \sum_i x_i^3 \dots \sum_i x_i^{m+1} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^N x_i^m \sum_i x_i^{m+1} \sum_i x_i^{m+2} \dots \sum_i x_i^{2m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N y_i \\ \sum y_i x_i \\ \vdots \\ \sum y_i x_i^m \end{pmatrix} \quad (13)$$

Для получения искомого вектора $\bar{\alpha}$ необходимо произвести обращение матрицы одним из стандартных способов.

Заметим, что при другой форме модели задачу минимизации $J_{уд}$ и поиска вектора $\bar{\alpha}$ приходится решать поисковым методом численной оптимизации, что значительно сложнее. Поэтому её обычно решают в интерактивном режиме, когда пользователь имеет возможность варьировать форму модели, число параметров, типы критериев, методы оптимизации и т.д.

Погрешность модели косвенного контроля имеет три составляющие:

$$\delta_{\text{ч}}^2 = \delta_{\text{модели}}^2 + \delta_{\text{измерений}}^2 + \delta_{\text{динамики}}^2 \quad (14)$$

Составляющая погрешности измерения $\delta_{\text{изм}}^2$ является взвешенной суммой погрешностей отдельных измерений и вклада в модель $\partial \varphi / \partial V$

$$\delta_{\text{изм}}^2 = \sum \left(\frac{\partial \varphi}{\partial V_i} \right)^2 \delta_{V_i}^2 \quad (15)$$

2.4. Компенсация и учёт динамики в системах косвенного контроля

Главная причина динамической погрешности $\delta_{\text{дин}}^2$ заключается в том, что искомый показатель и измеренный показатель находятся в разных пространствах измерений.

Различают следующие методы компенсации динамической погрешности:

1) Учет запаздывания

- Введение запаздывания $\tau_{\text{экв}} = \max R_{VZ}$, где

$R_{VZ}(t)$ – взаимно-корреляционная функция:

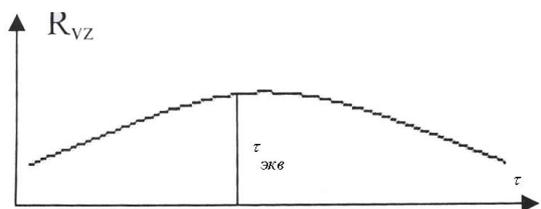


Рис. 2. Типичная взаимнокорреляционная функция для определения запаздывания

Для заданной дискретности измерений Δt имеем соответствие: $\tau_{экс} \Rightarrow [k-d]$. Тогда, для каждого $V_i(\tau - \tau_{экс})$ используем значение $V_i[k-d]$, относительно которого строится модель.

- коррекция параметров запаздывания за счет вычисления коэффициентов веса (β_0, β_1) линейной формы: $V_i(t - \tau_{экс}) \Rightarrow \beta_0 + \beta_1 V_i[k-d]$

2) Эквивалентное интегрирование

- замена текущего значения $V_i(t)$ его средним значением (интегралом) на интервале $(t, t+Q)$, чаще всего выбирается простейшая форма – скользящее среднее

$$\tilde{V}_i(t) = \frac{1}{\theta} \int_t^{t+Q} V_i(t) dt \Rightarrow \frac{1}{N_\theta} \sum_{k=1}^{N_\theta} V_i[k] \quad (16)$$

- коррекция параметров интегратора в линейной форме

$$V_i(t) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{N_\theta} \sum V_i[k] \right) \quad (17)$$

3) Одновременное введение запаздывания и скользящего среднего:

$$\tilde{V}_i(t) = \frac{1}{\theta} \int_t^{t+Q} V_i(t - \tau_{экс}) dt \quad (18)$$

Как и ранее, результат компенсации динамики может быть улучшен в линейной форме трансформации измерений:

$$\tilde{V}_i(t) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{\theta} \int_t^{t+Q} V_2(t - \tau_{экс}) dt \right) \quad (19)$$

Заметим, что значения $\tau_{экс}$ и Q являются разными для разных показателей V_i пространства измерений, так же как и коэффициенты линейных форм (β_0, β_1). Процесс определения всех этих параметров систем компенсации динамики стремятся формализовать и упростить разными вспомогательными приемами, но принципиально они остаются неизменными: запаздывание, усреднение, линейные формы [6].

2.5. Свойства линейности и адаптации.

Рассмотрение свойств линейности и адаптации ведется вследствие:

1) неполной наблюдаемости;

2) несовпадения пространства состояний и пространства наблюдений.

Вводятся гипотезы:

Если неполная наблюдаемость и несовпадение пространства состояний и пространства наблюдений имеют место, то на некотором ограниченном интервале времени можно принять гипотезу линейности [4].

Гипотеза линейности утверждает, что на некотором ограниченном интервале времени $[t_1, t_2]$ с определённой погрешностью $\delta_V^{2*} \leq \delta_V^2 \leq \delta_V^{2**}$ – пространство состояний и пространство измерений связаны линейно. Это можно выразить формулой:

$$\bar{v}_s = \|B\| \bar{v}_{изм} \quad (20)$$

Где $\|B\|$ – подлежит коррекции с помощью адаптивной процедуры на интервале $[t_1, t_3]$ (на интервале больше, чем $[t_1, t_2]$)

$$\|B\| \rightarrow adapt[t_1, t_3]$$

$[t_1, t_3]$ - время адаптации ($T_{адапт}$)

$[t_1, t_2]$ - время, когда верна гипотеза линейности ($T_{лин}$)

Из этих рассуждений следует, что при развитой процедуре адаптации можно ограничиться линейной моделью косвенного контроля, а при отсутствии адаптивных контуров – нужна более сложная нелинейная модель. Её коррекция ведется лишь на очень больших интервалах эксплуатации (месяц, квартал...), что эквивалентно изменению свойств стационарности объекта. Гипотеза линейности имеет также ограничение, которое выражают термином “наблюдаемость” [4] и сводится к определению ранга матрицы $\|B\|$.

Теперь, когда мы имеем все оценки составляющих погрешности метода косвенного контроля: ($\delta_{мод}^2, \delta_{изм}^2, \delta_{дин}^2$) процедуры коррекции модели могут быть направлены на изменения самой большой составляющей в первую очередь и соответственно либо изменяют пространство измерений, либо изменяют форму модели, либо улучшают процедуры компенсации динамики.

3. Моделирование и управление дискретных систем

Для использования построенных моделей в задачах управления следует учесть два обстоятельства: дискретность моделей и законов управления, а также адаптивность процедуры коррекции модели.

3.1. Общая постановка

Пусть задан многомерный линейный объект в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + B\bar{U} \\ \bar{Y} = C\bar{x} + D\bar{U} \end{array} \right. \quad (21)$$

системы дифференциальных уравнений в форме Коши.

Где A, B матрицы параметров пространства (состояний) $X(t)$;

$\bar{U}(t)$ - вектор управлений;

$\bar{Y}(t)$ - пространство измерений.

C, D – матрицы параметров пространства измерений. (Заметим, что $X(t)$ и $Y(t)$ переставимы по смыслу задачи).

Аналогом такого объекта является конечно-разностная система [5-6]:

$$\begin{cases} X[k+1] = AX[k] + BU[k] \\ Y[k] = Cx[k] + DU[k] \end{cases} \quad (22)$$

и структурная схема её моделирования представлена ниже.

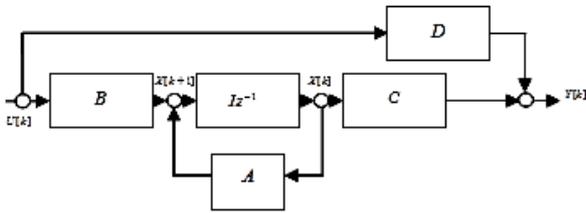


Рис. 3. Структурная схема реализации по (22)

Вспомним, что при построении модели были использованы элементы эквивалентного запаздывания для компенсации динамических погрешностей. Объекты с запаздыванием z^{-d} представляются цепочкой с несколькими единичными z^{-1} запаздываниями.

В общем случае различают объекты с запаздыванием по управлению, с запаздыванием по измерению и др.

Соответствующие уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} X[k+1] = AX[k] + BU[k] \\ Y[k+d] = Cx[k] \end{cases} \quad (23)$$

(задержка на выходе)

$$\begin{cases} X[k+1] = AX[k] + BU[k-d] \\ Y[k] = Cx[k] \end{cases} \quad (24)$$

(задержка по управлению)

В последнем случае структура схемы аналогична, но появляется запаздывание в канале управления (обратим внимание на несколько иное выражение для $Y[k]$)-т.е. имитирует скорость обработки информации:

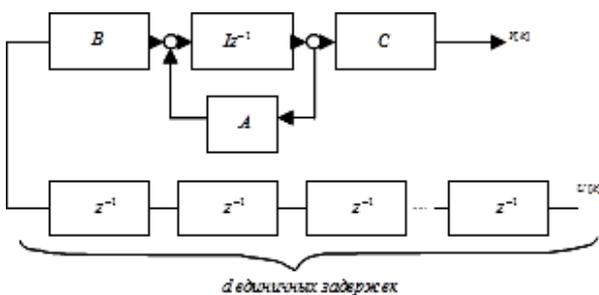


Рис. 4. Структура моделирования запаздывания

Несколько более сложно вводится внутренняя задержка [5]. Ещё раз подчеркнем, что понятие пространства состояний и измерений переставимы по физическому смыслу.

Обычно [7-9] используется квадратичный критерий качества, например, типа [10-12]:

$$I = X^T[N]Sx[x] + \sum_x [X^T[k]Qx[k] + U^T[k]RU[k]], \quad (25)$$

в котором учтены конечное состояние $X[N]$, текущие состояния $X[k]$ и затраты на управление с

определёнными требованиями к матрицам S, Q, R , включая условия существования $\min I$, особенно методы градиентной оптимизации с использованием сопряженных систем [7-12], условия устойчивости [13] и др.

Подобные структуры дискретных объектов используются в системах управления с “наблюдателем”, однако из-за того, что этот класс моделей – линейный, требуется постоянная коррекция коэффициентов таких моделей – т.е. дискретная адаптация.

$$A(t) \rightarrow A[k], B(t) \rightarrow B[k] \dots$$

Это обстоятельство следует учесть, т.к. мы фактически переходим к адаптивным системам (см. [5-7; 14-17]) или их различным модификациям (наблюдатели, упредители)

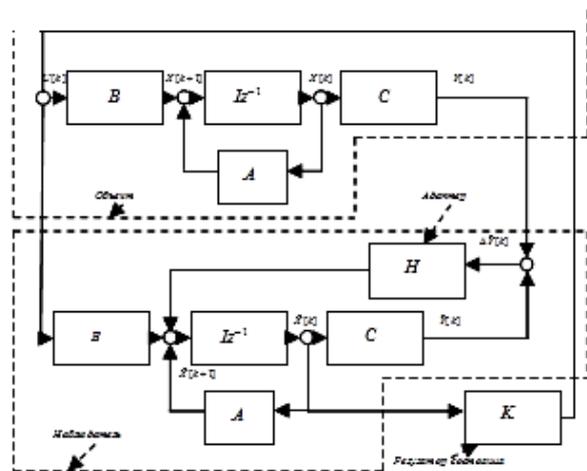


Рис. 5. Структура управления с наблюдателем

Ранее [4-5] было указано на невозможность использования ПИД-законов управления для объектов с большим запаздыванием, системы с “наблюдателем” позволяют преодолеть это ограничение. Пример соответствующей структуры приведен в ряде работ, например, упредитель Смита [5].

3.2. Особенности управления по косвенным измерениям

$$U[k] = K[e[k]] + T_0/T_1 \sum_{i=0}^k e[i-1] + T_D/T_0 [e[k] - e[k-i]] \quad (26)$$

В приведенном выше уравнении (26) для ПИД-регулятора приняты обозначения:

K - обобщенный коэффициент передачи центрального регулятора;

$T_0 = \Delta t$ - такт квантования;

T_1 - время интегрирования;

T_D - время дифференцирования (постоянная времени дифференцирования).

Форсированное управление

Стремясь упростить выражение для $U[k]$, поступим следующим образом: запишем управление для $U[k-1]$ и найдем значение для приращения управления $\Delta U[k]$; тогда получим:

$$\left\{ \begin{aligned} U[k-1] &= k[e[k-1]] + \frac{T_D}{T_0} \sum_{i=0}^{k-1} e[i-1] + \\ &+ \frac{T_D}{T_0} [e[k-1] - e[k-2]] \\ \Delta^* U[k] &= U[k] - U^* \\ [k-1] &= q_0 e[k] + q_1 e[k] + q_2 e[k] \end{aligned} \right. \quad (27)$$

– формула форсированного управления которая показывает, что $\Delta U[k]$ (приращение управления) – это линейная комбинация ошибок $e[k]$ на данном и двух предыдущих шагах управления; в более общем виде:

$$\Delta U^*[k] = \sum_{i=0}^{k-1} q_i e[k-i] \quad (28)$$

где i – количество шагов “назад” зависит от принятых численных методов интегрирования и дифференцирования (известны модификации до 4-х шагов назад), но в любом случае это значительно меньше, чем при использовании выражения (26).

Замечание – нужно иметь в виду, что теоретическое и истинное значение управления могут отличаться, поэтому при форсированном управлении значение $\Delta U^*[k-1]$ должно строго контролироваться. Значения коэффициентов q_0, q_1, q_2 также зависят от метода интегрирования и дифференцирования [1,4-5].

Чтобы установить настройку для ij -ого контура необходимо знать динамические свойства объекта. Определение динамических свойств линейных объектов происходит путем подачи на вход тестового воздействия.

В связи с этим выделяют различные типы воздействий по управлению.

Тестовые воздействия по управлению могут быть разных типов:

- а) импульсное воздействие;
- б) скачкообразное (ступенчатое);

с) частотное (обычно это синусоида с попеременным изменением частоты в диапазоне от ω_0 до $\omega_{\bar{m}\bar{c}}$).

Реакция на частотное воздействие после обработки сводится к построению частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ, АФЧХ), интересно использовать для этих целей спектральное представление системы [14]. Конечно, своя специфика у объектов с распределенными параметрами [10,16] при их приведении к обыкновенным дифференциальным системам.

Замечание: при моделировании подобных систем мы предполагаем, что объект является непрерывным со своей передаточной функцией $W_{ij}(S)$ либо матрицей передаточных функций для объекта в целом $\|W\|$.

Если требования непрерывности объекта не соблюдаются, мы должны рассматривать его как дискретный и при моделировании внести соответствующие коррективы, которые основаны на

понятиях дискретных или импульсных систем. Такой учёт дискретности нужен для “быстрых” объектов, переходные процессы в которых соизмеримы со временем обработки и прохождения информационных потоков в ЭВМ и других технических средствах (ЦАП, АЦП, каналы связи со средствами защиты) информационно-управляющей системы в целом. Наконец, в более сложных случаях объект можно представить как последовательное соединение дискретной и непрерывной (низкочастотной) частей. Дискретная передаточная функция имеет вид:

$$W(S) \Rightarrow G(z) = \frac{A(z)}{B(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_m z^{-m}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}$$

Для большинства физических объектов $m \leq n$. В известных пособиях по импульсным системам [1,4,5] приводятся таблицы перехода от непрерывных передаточных функций к дискретным, например, для типовых звеньев:

№	W(s)	G(z)	Расчет коэффициентов	Примечание
1	$\frac{k}{1+Ts}$	$\frac{a_0}{1+b_1 z^{-1}}$	$a_0 = k/T$ $b_1 = e^{-aT_0}$	Инерционный объект 1-ого порядка
2	$e^{-\tau s}$	z^{-d}	$d = \tau / T_0$	Звено запаздывания
3	$W(s)e^{-\tau s}$	$G(z)z^{-d}$		Последовательное соединение двух звеньев
4	$\frac{k(1-T_1 s)}{(1+T_1 s)(1+T_2 s)}$	$\frac{a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1+b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}$		Объект с неминимально-фазовой характеристикой
5	$\frac{k(1-T_3 s)e^{-\tau s}}{(1-T_1 s)(1-T_2 s)(1-T_3 s)}$	$\frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}}{1+b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3}}$		Наиболее общее представление

Соответственно данным приведенной таблицы вводятся коррективы в структурные схемы рис. 3-5.

4. Заключение

Таким образом рассмотрены в данной статье все этапы построения моделей косвенного контроля:

от выбора попространства измерений до построения адекватной идентифицированной модели.

Для задач управления с использованием таких моделей косвенного контроля предпочтительной является линеаризованная форма системы дифференциальных уравнений в дискретной форме с периодической адаптивной коррекцией.

Литература

1. Подвальный, С.Л. Информационно-управляющие системы мониторинга сложных объектов [Текст] / С.Л. Подвальный. - Воронеж, 2010
2. Подвальный, С.Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный. - М., 1979.
3. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного анализа [Текст] / А.А. Колесников. - М., 2006.
4. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления [Текст] / А.А. Воронов. - М., 1986.
5. Изерман, Р. Цифровые системы управления [Текст] / Р. Изерман. - М., 1984.
6. Ицкович, Э.Л. Методы рациональной автоматизации производства [Текст] / Э.Л. Ицкович. - М., 2009.
7. Подвальный, С.Л. Особенности поисковой градиентной оптимизации сложных объектов с использованием сопряженных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т. 56. - № 2. - С. 18-22.
8. Подвальный, С.Л. Модульная структура системы многоальтернативного моделирования процессов полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный, А.В. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т.9. - №5-1. - С.41-43.
9. Подвальный, С.Л. Модели многоальтернативного управления и принятия решений в сложных системах [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Системы

управления и информационные технологии. - 2014. - Т.56. - №2.1. - С. 169-173.

10. Подвальный, С.Л. Оптимизация по стартовым условиям параболической системы с распределенными параметрами на графе [Текст] / С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т.58. - № 4. - С. 70-74.

11. Подвальный, С.Л. Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Управление большими системами: сборник трудов. - 2014. - № 48. - С.6-58.

12. Подвальный С.Л. Многоальтернативное управление экспериментом с использованием моделей сопряженных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2016. - Т.12. - №4. - С.19-25

13. Александров, А.Ю. Об устойчивости решений одного класса нелинейных систем с запаздыванием [Текст] / А.Ю. Александров, А.П. Жабко // Автоматика и телемеханика. - 2006. - №9. - С. 3-14.

14. Веремей, Е.И. Спектральное представление оптимальных решений задач среднеквадратичного синтеза [Текст] / Е.И. Веремей // Системы управления и информационные технологии. - 2012. - Т.49. - №3. - С. 124-128.

15. Подвальный, С.Л. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления [Текст] // С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т.57. - №3. - С.4-8.

16. Провоторов, В.В. Начально-краевые задачи с распределенными параметрами на графе [Текст] / В.В. Провоторов, А.С. Волкова. - Воронеж, 2014.

17. Podval'ny S.L., Ledeneva T.M. Intelligent Modelling Systems: Design Principles/ Automation and Remote Control. 2013, Т.74., №7, С.1201-1210

Воронежский государственный технический университет

CREATION OF INDIRECT CONTROL MODELS IN INFORMATION COMPUTER SYSTEMS

S.L. Podvalny, Doctor of technical sciences, Full professor, Head of department, Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail:spodvalny@yandex.ru

In this paper we examined general problems of creation of modeling for some quality parameters on the technological object output in typical variant: needed parameter is not automatic measured-but we have much ones which may to be measured in information and control system (ICS). We need to build the indirect model after preliminary reduction the space of measure as professional so formal computer methods. Statistics regression double filters are used for reduction. Also we use schemes of smooth integrate and delay for improving the model. Structure of the indirect model is introduce as additive sum on the systems of typical functions with unknown parameters. Additional identification task is a problem to solve a system of linear equations (for square criteria) or typical task of linear programming (for module criteria). The structure of estimation of indirect model was used in detail. At last the control system is build as linear digital scheme with adaptive correction in real time

Key words: indirect control, statistical model, regression matrix, dynamical estimations, identification

References

1. Podvalny S.L. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy monitoring slozhnykh ob'ektov [Information and Control Systems of Complex Objects Monitoring], Voronezh, Nauchnaya Kniga, 2010
2. Podvalny S.L. Modelirovanie promyshlennykh protsessov polymerizatsii [Industrial Polymerization Process Modeling], Moscow: Khimiya, 1979

3. Kolesnikov A.A. Synergetichiskie metody upravleniya slozhnymi sistemami :teoriya sistemnogo analiza [Synergetical methods of Complex objects Control :theory of systems analyzing], Moscow, 2006
4. Voronov A.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya [Theoretical basis of automation control], Moscow:Nauka,1986
5. Izerman R. Tsyfrovyye sistemy upravleniua [Digital Control Systems], Moscow: Mir, 1984
- 6.Itskovich E.L.Metody ratsional'noy avtomatizatsii proizvodstva [Methods of Rational Automation Production], Moscow, 2009
7. Podvalny S.L.Osobennosti poiskovoy gradientnoj optimizatsii slozhnykh objektov s ispolzovaniem sopryazhennykh system [Search Engine Features in Gradient Optimization of Complex Objects Using Adjoint systems], Syst.Upravl. Inform. Tekhnol.,2014.vol.56. no.2. pp.18-22.
8. Podvalny S.L. Modul'naya struktura sistemy mnogoalternativnogo modelirovaniya processov polymerizatsii [Modular Structure of the systems Multi-alternative modeling of Polymerization Processes], Vestn. Voronezh. Gos. Techn. Univer.2013. vol.9. no. 5-1. Pp.41-43
9. Podvalny S.L., Vasiljev E.M. Modeli mnogo-alternativnogo upravleniya I prinyatiya reshenij v slozhnykh sistemakh [A Model of Multi-alternative control and Decision-making in Complex Systems], Syst. Upravl. Inform. Technol. 2014. Vol.56. no.2.1. pp.169-173/
10. Podvalny S.L., Provotorov V.V.Optimizatsiya po startovym usloviyam parabolicheskoy sistemy s raspredelennymi parametramy na grafe [Optimization of Initial Conditions with distributed Parameters on the Graph], Syst. Upravl. Inform. Technol. 2014. Vol.58., no.58., pp 70-74
11. Podvalny S.L., Vasiljev E.M.Mnogoalternativnoe upravlenie otkrytymi sistemami : kontseptsiya, sostoyanie I perspektivy [A Multi-alternative approach to Control in Open Systems : origin ,Current State and Future Prospects],Upravl. Bolsh.Syst., 2014, no.48., pp.6-58
12. Podvalny S.L. Mnogoalternativnoe upravlenie eperimentom s ispolzovaniem sopryazhennykh system [Multi-alternative Control of the Experiment Using the Models of Conjugated systems] , Vestn. Voronezh. Gos. Techn. Univer.,2016., Vol.12., no.4., pp.19-25.
13. Alexandrov A.Yu., Zhabko A.P. Ob ustojchivosti reshenii odnogo klassa nelineynykh system a zapazdyvaniem [About of Stability one class of systems with delay] , Avtom. Telemekh., 2006., no.9., pp. 3-14.
14. Veremej E.I. Spektralnoe predstavlenie optimalnykh reshenii zadach srednekvadratichnogo sinteza [Spectral introducing for optimal decision of square synthesis], Syst. Upravl. Inform. Technol. 2012., vol.49., no.3., pp.124-128.
15. Podvalny S.L., Vasiljev E.M. Evolyutsionnye printsipy postroeniya intellektualnykh system mnogoalternativnogo upravleniya [Evolutionary principles of Intelligent systems multi-alternative control], Syst. Upravl. Inform. Technol. , 2014., vol. 57., no.3., pp.4-8.
16. Provotorov V.V., Volkova A.S. Nachalno-kraevyye zadachi s raspredilennymi parametrami na grafe [Initial-bounded tasks for distributed parameters on the graph], Voronezh, Nauchnaya kniga, 2014.
17. Podval'ny S.L., Ledeneva T.M. Intelligent modeling systems: design principles / Automation and Remote Control.,013., vol.74., no.7., pp.1201-1210

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МНОГОВАРИАНТНОЙ ИНТЕГРАЦИИ

А.А. Рындин, С.В. Сапегин

В статье рассматриваются проблемы конструирования сложных программных комплексов для предприятий, работающих в сфере агротехники и сельского хозяйства. Разработка современных программных систем связана с автоматизацией различных аспектов человеческой деятельности, что, в свою очередь, связано с решением сложных нестандартных задач в области построения архитектур и технологий разработки ПО. Современные направления развития методологий разработки ПО, преследуя цели качества, приводят во многих случаях к значительной избыточности трудозатрат. Использование технологии разработки сложных программных систем управления предприятием на основе использования методов многовариантной интеграции позволяет принимать более качественные проектные решения, одновременно обеспечивая приемлемый уровень гибкости, функциональности и качества работы современных программных приложений. При этом методы многовариантной интеграции применимы как на уровне комбинирования групп архитектурных, технологических и организационно-ориентированных подходов, так и в рамках одного из перечисленных подходов для рационализации решений, возникающих в процессе построения ИС. Внедрение полученных результатов в процесс развития корпоративной ИС для предприятий агротехнического сектора позволило добиться существенных результатов по сравнению с исходными данными - оценками, прогнозами и т.д.

Ключевые слова: программная инженерия, многовариантная интеграция, корпоративные системы, управление предприятием

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы организации процесса разработки программного обеспечения, конструирования эффективных архитектур и выбора проектных решений являются одними из самых важных в области производства ПО. Несмотря на большое количество попыток формализации процесса конструирования и создания программного обеспечения, на практике лишь немногие из них могут с определенной долей вероятности обеспечить требуемый результат. Это, во многом, обусловлено характером процесса разработки ПО, связанным с тем, что характер деятельности разработчика программного обеспечения достаточно специфичен по сравнению с другими видами человеческой деятельности.

Разработка программного обеспечения на современном уровне развития технологий и методологий является сложной, творческой задачей, решение которой, как правило, неочевидно и зачастую приводит к непредсказуемым результатам. Несмотря на большое количество попыток формализации процесса конструирования и создания программного обеспечения, на практике лишь немногие из них могут с определенной долей вероятности обеспечить требуемый результат. Это обусловлено тем, что характер деятельности разработчика программного обеспечения достаточно специфичен по сравнению с другими видами человеческой деятельности. Кроме того, информационные системы, в рамках которых используется разрабатываемое ПО, представляют

собой сложные, многокомпонентные системы с динамично изменяющейся структурой.

Использование современного ПО связано с необходимостью решения задач автоматизации различных аспектов человеческой деятельности. При этом программные системы находятся в плотном взаимодействии друг с другом, совместно используют аппаратные и сетевые вычислительные ресурсы предприятия, а также задействуют в своей работе, как минимум, ключевых сотрудников.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Развитие современных технологий разработки программного обеспечения в настоящее время осуществляется в рамках следующих направлений:

1. Построение гибких, настраиваемых архитектур, основанных на принципах объектно-ориентированного проектирования (ООП) и компонентного подхода, многоплатформенной реализации, широкого использования слабосвязных решений, основанных на параметризации типов, использовании сообщений и «мягких» стандартов взаимодействия ПО.

2. Повышение качества программных компонентов путем введения популярных шаблонов и стандартов их разработки. Увеличение за счет используемых стандартов и практик скорости изготовления компонентов, легкости поддержки, изменения и доработки, соответствия популярным паттернам проектирования.

3. Построение и отладка гибкого процесса разработки ПО, включающего в себя непрерывное тестирование и интеграцию, максимально эффективно использующего человеческие ресурсы.

Целями использования подходов каждого из этих направлений является достижение

Рындин Александр Алексеевич - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: alexandr.a.ryndin@me.com
Сапегин Сергей Владимирович – ВГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: svsapegin@mail.ru

предсказуемости процесса разработки, борьба с проявлением следствий все более увеличивающейся сложности ПО, достижение максимально возможного качества ПО в процессе его разработки. При этом результат достигается, практически полностью за счет увеличения средней трудоемкости разработки ПО на начальных стадиях.

Вместе с тем, растущая сложность программных комплексов приводит ко все большим трудностям разработки в рамках каждого из вышеперечисленных направлений. Кроме того, качество конечного результата и прогноз затрат становится все менее предсказуемыми на начальных стадиях проекта. Это вынуждает разработчиков прибегать к постоянному поиску и развитию новых методологий, каждая из которых, в свою очередь имеет свои ограничения и приводит к следующим характерным проблемам:

1. Избыточность затрат на оборудование и платформенные продукты, вызванная непредсказуемостью поведения требований в процессе развития математического и программного обеспечения вычислительного комплекса предприятия;

2. Избыточная трудоемкость разработки компонентов ПО, предназначенных для решения задач на коротком отрезке времени;

3. Избыточность трудозатрат, связанных с интеграцией программных средств от различных производителей и команд разработчиков;

4. Избыточная функциональность используемых программных комплексов, отсутствие глубокой интеграции между их компонентами;

5. Несбалансированность показателей качества удовлетворенности пользователей, вызванная несогласованностью стратегии развития ИС

СТРУКТУРА ЗАДАЧИ

На основе классификации используемых представлений, среди современных практик разработки ПО можно выделить следующие группы подходов:

1. Архитектурные подходы, в основе которых лежит идея о важности хорошо проработанной, единообразной архитектуры с четким делением программного средства на подсистемы и компоненты.

2. Технологические подходы, связанные с исследованием современных подходов к написанию программного кода, включая различные парадигмы, языки и среды программирования и построения на их основе эффективного процесса производства ПО.

3. Организационно-ориентированные подходы, рассматривающие проблему построения программного средства с точки зрения организации наиболее эффективного процесса работы с пользовательскими требованиями.

Использование в современных методиках разработки на приоритетной основе одной из групп вышеперечисленных подходов в случае применения их для построения развивающихся ПК характеризуется следующими недостатками:

1. Увеличение проектных рисков вследствие невозможности предсказать развитие проектов с достаточной точностью и обеспечить необходимый комплекс мер, обеспечивающий их успешность.

2. Принципиальная невозможность рационализации процесса создания ПО в рамках одной парадигмы. Реально используемые методики обычно имеют в своем составе набор эмпирических правил, гарантирующих определенную вероятность успеха, но теоретически недостаточно изученных в рамках господствующей парадигмы. В подобных случаях попытка реорганизации процесса разработки ПО, как правило, ведет к формально успешному результату только в рамках принятой парадигмы, в то время, как с точки зрения удовлетворения информационных потребностей пользователей - к серьезному повышению вероятности неуспешного результата.

Необходимость учета системных связей, а также совместного влияния нескольких типов неопределенностей в процессе нахождения рациональных решений приводит к развитию моделей, в которых получение точного решения является неэффективным, так как в ходе поиска оптимального варианта теряется возможность анализа группы доминирующих вариантов решений. Вместе с тем, расширить возможности системного подхода для решения задачи проектирования и разработки программных компонентов удастся, если использовать в качестве количественной характеристики рационального выбора варианты информационной характеристику – энтропию многовариантной интеграции, определяющую степень разнообразия множества возможных вариантов интеграции. В условиях динамичного развития и изменения структуры рациональных решений зачастую именно энтропия является единственным показателем, на основе которого представляется возможным сделать выбор решения, обеспечивающего оптимальное развитие сложных программных пакетов в условиях неопределенности.

МЕТОДОЛОГИЯ

Рассмотрим процесс построения программного комплекса в виде маршрута проектирования, состоящего из последовательности задач многокритериального выбора, причем результат каждого выбора влияет на траекторию последующего развития системы. Элементами выбора в процессе проектирования корпоративной ИС являются элементы вектора \vec{W}_g , каждый из которых, в свою очередь, содержит в себе набор компонентов, из которых состоит

система. Элементы выбора $w_g = \overline{1, W_g}$ в целом задают вариант

$$S_l = (w_1, w_2, \dots, w_g, \dots, w_G) \in S \quad (1)$$

и характеризуются вектором параметров f_{w_g} .

При переходе от одной реализации $w_g = \overline{1, W_g}$ к другой компоненты вектора f_{w_g} меняются дискретным образом.

Выбор оптимального с точки зрения сложности воплощения варианта маршрута проектирования и реализующих его технических средств, с учетом многовариантности задания архитектуры ИС и принципов интеграции, осуществляется по совокупности технико-экономических показателей. Выбранный маршрут проектирования должен обеспечить проектирование ПО с заданными эксплуатационными характеристиками: надежностью, эффективностью, функциональностью и т.д. Эксплуатационные характеристики ПО образуют подмножество, определяющее выбор варьируемых элементов процесса проектирования.

Для того, чтобы сформулировать принципы многовариантной интеграции, исследуем природу задачи проектирования сложных систем. Задача рационального синтеза в общем случае состоит в выборе наилучшего варианта $s \in S$, где S – общее множество, обладающее разнообразием элементов. Выбор S осуществляется путем поэтапного исключения вариантов, не обеспечивающих выполнения заданных требований, т.е. ограничения разнообразия, выражающего отношение между двумя подмножествами, когда в одном из них разнообразие уменьшается в результате наложения каких-либо ограничений. Известные на настоящий момент методы перебора, ориентированные на редукцию разнообразия множества S , позволяют получить решение в приемлемый период расчета только для задач синтеза, ограниченных определенностью связи параметров вариантов систем с требованиями $F_i (i = \overline{1, I})$, а также определенности требования к условиям функционирования систем, для которых в виде аналитического выражения сформулированы критерии, в целом оценивающий эффективность системы.

Для измерения в целом степени разнообразия вариантов, связанных вероятностными соотношениями, наиболее эффективно использовать энтропию, которая, например, для множества вариантов α имеет вид

$$H(\alpha) = -\sum_{n=1}^N P_n^\alpha \lg P_n^\alpha \quad (2)$$

и характеризуется рядом свойств:

она симметрична относительно координат вектора P^α , т.е. не зависит от взаимного расположения P_n^α ;

она достигает своего максимума на векторе P^α с координатами $P_n^\alpha = 1/N, \forall n = \overline{1, N}$, т.е. когда все варианты равнозначны;

она достигает своего минимума на векторе P^α , с координатами $P_v^\alpha = 1, P_n^\alpha = 0, \forall n \neq v$, т.е. когда пригодным для реализации оказывается единственный вариант интеграции.

При этом, необходимо придерживаться принципов локальной и многовариантной интеграции, максимальной надежности и адекватности.

В случае общего поиска эффективных решений в процессе разработки программного обеспечения целесообразно осуществлять комбинирование групп архитектурных, технологических и организационно-ориентированных подходов. Поставим в соответствие каждой группе подходов множества вариантов-кандидатов

$$\begin{aligned} \alpha &= \{A_1, \dots, A_n, \dots, A_N\} = \{A_n, n = \overline{1, N}\}, \\ \beta &= \{B_1, \dots, B_m, \dots, B_M\} = \{B_m, m = \overline{1, M}\}, \\ \gamma &= \{C_1, \dots, C_l, \dots, C_L\} = \{C_l, l = \overline{1, L}\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где N, M, L – количества вариантов, выделенных в рассматриваемое множество на основе анализа задачи с помощью соответствующего представления. Предпочтительность использования каждого из вариантов без учета связи с остальными вариантами выразим в виде следующих векторов вероятностей:

$$\begin{pmatrix} P^\alpha = (P_1^\alpha, \dots, P_n^\alpha, \dots, P_N^\alpha), \sum_{n=1}^N P_n^\alpha = 1 \\ P^\beta = (P_1^\beta, \dots, P_m^\beta, \dots, P_M^\beta), \sum_{m=1}^M P_m^\beta = 1 \\ P^\gamma = (P_1^\gamma, \dots, P_l^\gamma, \dots, P_L^\gamma), \sum_{l=1}^L P_l^\gamma = 1 \end{pmatrix}$$

Сочетаемость вариантов разных уровней можно определить в виде условных вероятностей их совместного использования.

СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Рассмотрим задачу формирования плана автоматизации оперативного контура работ агротехнического предприятия. Агротехническое предприятие представляет в целом достаточно сложную, разнородную структуру с большим объемом специфичных, разнонаправленных производственных процессов, совокупная деятельность которых обеспечивает работу предприятия. Каждый из процессов обладает уникальным профилем (циклическим, периодическим либо линейным), среди основных

направлений развития ИТ в агробизнесе можно выделить следующие:

- планирование агротехнических мероприятий
- планирование ремонта техники
- учет и оперативный контроль техники
- управление мотивацией сотрудников,
- учет урожая

и др. При этом, автоматизация различных направлений деятельности предприятия рассматривается, как один из источников повышения финансовой эффективности, что дает возможность использования экономических показателей предприятия в качестве основных критериев рациональности принимаемых решений.

Для определения информационных потребностей предприятия была составлена общая информационная модель предприятия, включающая в себя сущности, их взаимосвязь, информационные и управляющие потоки. В рамках проекта была осуществлена иерархическая декомпозиция модели и определены условные единицы автоматизации.



Стартовая страница ПК «Агрополе»

На следующем этапе был проведен анализ платформенного обеспечения (состав используемых ПК, сетевого оборудования, используемые виды ОС (кроме серверов – различные варианты Windows), ПО общего назначения (MS Office, пакеты коммуникационных и организационных программ), а также имеющиеся средства автоматизации производственных процессов (ПО на платформе 1С, SCADA-системы, мобильные приложения и т.д.) и связи между ними.

Воронежский государственный технический университет
Воронежский государственный университет

THE TECHNOLOGY OF DEVELOPMENT OF COMPLEX SOFTWARE SYSTEMS OF MANAGEMENT, BASED ON METHODS OF MULTIVARIANT INTEGRATION

A.A. Ryndin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: alexandr.a.ryndin@me.com

S.V. Sapegin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: svsapegin@mail.ru

В качестве исходного пакета был сформирован набор сервисов, автоматизирующих задачи предприятия, причем осуществлено максимальная детализация компонентов, способных работать автономно. Результатом работы стало формирование рационального стратегического плана конструирования программных компонентов ИС агротехнического предприятия.

Процесс детального конструирования программного обеспечения для автоматизации был разбит на фазы, соответствующие задачам автоматизации первого уровня иерархии (см. рис.1). После этого для каждого набора задач процесс конструирования был организован итеративным образом – разбит на несколько фаз, причем в течении каждой фазы осуществлялась разработка версии ПО, после чего функциональность проверялась на соответствие пользовательским требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование методов многовариантной интеграции для комплексной оценки траекторий развития информационных экосистем предприятий, а также для выбора наиболее оптимального подхода к конструированию компонентов ПО в рамках корпоративной ИС является одним из способов повышения конкурентоспособности предприятия в текущих условиях.

Литература

1. Проектирование корпоративных информационных систем [Текст] /А.А. Рындин, А.В. Хаустович, Д.В. Долгих, А.И. Мугалев, С.В. Сапегин ; под ред. А.А. Рындина. - Воронеж, Изд-во Кварта, 2003, 447 с.
2. Системная инженерия. Принципы и практика [Текст] / А. Косяков, У. Свит и др. - М.: ДМК-Пресс, 2014
3. Тельнов, Ю.Ф. Интеллектуальные информационные системы в экономике [Текст]: учеб. пособие / Ю.Ф. Тельнов. - М.: СИНТЕГ, 1998, 216 с.
4. Яковсон, А. Унифицированный процесс разработки программного обеспечения [Текст]/ А. Яковсон, Г. Буч, Дж. Рамбо. – СПб.: Питер, 2002. – 496 с.
5. Executing SOA: A Practical Guide for the Service-Oriented Architect: Norbert Bieberstein, Robert G. Laird, Keith Jones, Tilak Mitra, IBM Press, 2008, P. 240
6. Manifesto for Agile Software Development, <http://agilemanifesto.org>

The article deals with the problem of designing complex software systems for companies working in the field of farming and agriculture. Development of modern software systems related to the automation of various aspects of human activity, which, in turn, is connected with the solution of complex, non-standard tasks in building architectures and software development technologies. Modern directions of development of the software development methodologies in pursuit of quality objectives, in many cases, lead to significant labor redundancy. The use of technology in developing complex software enterprise management systems through the use of multivariate methods of integration allows you to make better design decisions, while ensuring an acceptable level of flexibility, functionality and performance of modern software applications. At the same time, methods of multivariate integration apply at the level of groups combining architectural, technological and organizational-oriented approaches, as well as in the framework of one of these approaches for the rationalization of decisions arising in the process of building the IS. Implementation of the results obtained in the process of corporate development of IS for the crop sector enterprises has allowed to achieve significant results in comparison with the original data - estimates, forecasts, etc.

Key words: software engineering, multivariate integration, corporate systems, enterprise management

References

1. Proektirovanie korporativnyh informacionnyh system [Design of corporate information systems] /A.A.Ryndin, A.V.Haustovich, D.V. Dolgih, A.I. Mugalev, S.V. Sapegin / pod red. A.A. Ryndina, Voronezh, Izd-vo Kvarta, 2003, 447 p.
2. Sistemnaja inzhenerija. Principy i praktika [Systems engineering. Principles and practice]. Kosjakov A, Svit U. i dr. .M.:DMK-Press, 2014
3. Tel'nov Ju. F. Intellektual'nye informacionnye sistemy v jekonomike [Intelligent information systems in economy].- M.: SINTEG, 1998, 216 p.
4. Jakobson I., Booch G., Rumbaugh j. Unificirovannyj process razrabotki programmnogo obespechenija [a Unified process of software development]. – Spb.: Piter, 2002. – 496 p.
5. Executing SOA: A Practical Guide for the Service-Oriented Architect: Norbert Bieberstein, Robert G. Laird, Keith Jones, Tilak Mitra, IBM Press, 2008, P. 240
6. Manifesto for Agile Software Development, <http://agilemanifesto.org>

АДАПТИВНОЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

В.В. Колуков, Ю.С. Сахаров, В.Н. Кострова

Рассматривается подход к созданию интеллектуальных САПР (ИСАПР) электронных средств (ЭС), заключающийся в разработке модели знаний предметной области, основанной на формировании множества отношений элементов и ее графового представления. Также предложена семантическая модель, позволяющая систематизировать знания об объекте проектирования с выработкой маршрутов проектирования электронных средств. Предлагается подход и его реализация в виде прототипов специализированных экспертных систем (СЭС) для решения задач конструкторского проектирования ЭС в ИСАПР - поиска предварительного варианта конструкции, обеспечения защищенности ЭС от механических и тепловых воздействий и для обучения проектированию. Данный подход позволяет объединить и систематизировать известные и выявлять новые знания, как по отдельным составным частям предметной области, так и в целом методологии проектирования, повышать эффективность процесса проектирования и обучения проектированию, а в конечном итоге повысить качество ЭС и снизить затраты на проектирование

Ключевые слова: интеллектуальные САПР, проектирование, моделирование, электронные средства, экспертные системы

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для повышения эффективности систем автоматизированного проектирования (САПР) электронных средств (ЭС) актуальным являются вопросы поиска, систематизации, моделирования знаний и, в дальнейшем, построения прототипов интеллектуальных САПР (ИСАПР) для конструирования ЭС.

Первоначально осуществляется формирование модели знаний предметной области.

Все знания о проектировании представляются в виде четырех классов:

- Технического задания – строго определённый набор требований.

- Процесс конструирования – действия, проводимые в ходе проектных работ.

- Объект – конструкция ЭС, результат проектирования.

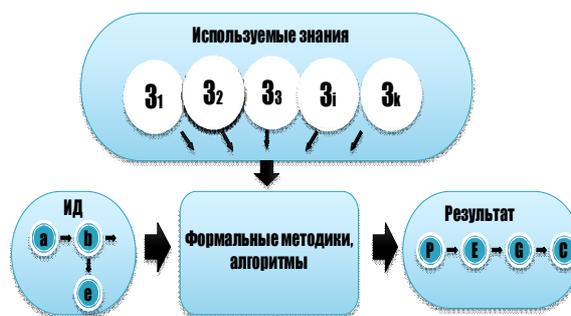
- Знания – совокупность разнообразных знаний о предметной области.

Далее формируются модели для указанных классов знаний предметной области.

СБОР И СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЗНАНИЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Следующим этапом является извлечение полного набора знаний о предметной области, структурирование их в виде иерархических

сущностей со всеми отношениями с последующей визуализацией модели (рис. 1).



ИД (исходные данные) – где a, b, e и т.д. – элементы ИД необходимые для работы формальных методик.

Используемые знания – где $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_i, \dots, Z_k$ – элементы знаний, отсутствующие в ИД, но необходимые для работы формальных методик.

Результат – где P, E, G, C – элементы модельного описания объекта – результата.

Рис. 1. Методика сбора необходимых знаний

Далее проводится систематизация найденных элементов знаний по следующим группам (метапонятия): данные **ТЗ**, информация о **результате**, дополнительно использованные **знания**, знания о **процессе** поиска решения.

В заключении выполняется группирование элементов знаний внутри метапонятий – построение **иерархии знаний** и поля знаний предметной области в виде таблиц, диаграмм, графов, рисунков и т.д. Возможно использование технологий визуализации ERD, SADT, DFD, UML и т.д. Например, для моделирования ПО по задаче предварительной компоновки конструкции ЭС использована DFD-технология. Далее представлены разработанные модели основных сущностей ПО.

Колуков Владимир Васильевич – МТУ-МГУПИ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vykolukov@mail.ru
Сахаров Юрий Серафимович – МТУ-МГУПИ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: sakharovu@yandex.ru
Кострова Вера Николаевна – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: kostrova_v@mail.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Для описания технической системы вводится в явном виде указание на основную особенность (или свойство) организации (или действия) ТС - принцип действия. В общем случае их может быть несколько, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$. Тогда модель ТС будет выглядеть следующим образом

$$S = \{P, E, g, C\}, \quad (1)$$

где P – множество принципов, E – элементы (части) ТС, g – структура (схема), C – множество параметров ТС.

Очевидно, ЭС является частным случаем ТС и оно может представляться указанным выше способом. Рассматривая особенности ЭС, предложено [1] множество отношений R между элементами E разделить по их природе на электромагнитные $R_{ЭМ}$, механические R_M , тепловые R_T и геометрические (пространственные, компоновочные) R_K , т.е. $R = \{R_{ЭМ}, R_M, R_T, R_K\}$, со своими структурами $g_{ЭМ}, g_M, g_T, g_K$ и конститuentами $C_{ЭМ}, C_M, C_T, C_K$. Тогда ЭС может быть представлено в виде

$$S = \{P, E, G, C\}, \quad (2)$$

где S – электронное средство, P – принципы организации ЭС, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$; E – элементы ЭС, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$; G – множество структур, $G = \{g_{ЭМ}, g_M, g_T, g_K\}$; C – множество параметров, $C = \{C_{ЭМ}, C_M, C_T, C_K\}$.

Качественное различие отношений R определяет в системе S существование ряда природноразличных подсистем: электромагнитной $S_{ЭМ}$, механической S_M , тепловой S_T , пространственной (геометрической, компоновочной) S_K . В общем случае указанные подсистемы взаимодействуют между собой и ЭС можно представить как (рис. 2)

$$S = \{S_s, R_s\}, \quad (3)$$

где S_s – множество подсистем, $S_s = \{S_{ЭМ}, S_T, S_M, S_K\}$; R_s – семейство отношений между подсистемами.

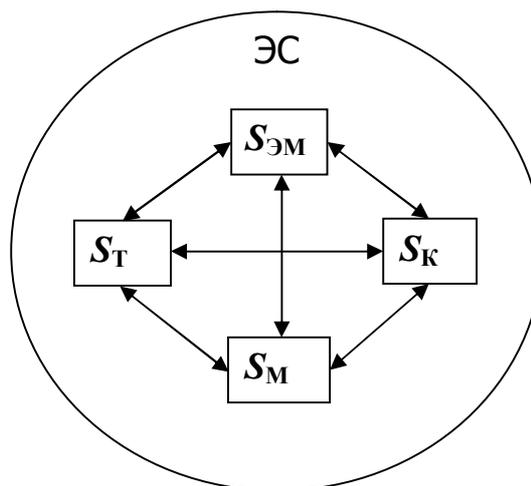


Рис. 2. Модель ЭС, $S = \{S_{ЭМ}, S_T, S_M, S_K, R_s\}$; $S_{ЭМ}, S_T, S_M, S_K$ – подсистемы, образующие систему S – ЭС; R_s – отношения между подсистемами

При графической интерпретации указанных моделей, удастся свести необходимые знания о всём разнообразии ЭС к простому модельному представлению в виде графа (рис. 3), который эффективно может быть размещен в базе. Разнообразие вариантов ЭС определяется множеством принципов P , элементов E , структур G и параметров C реализации.

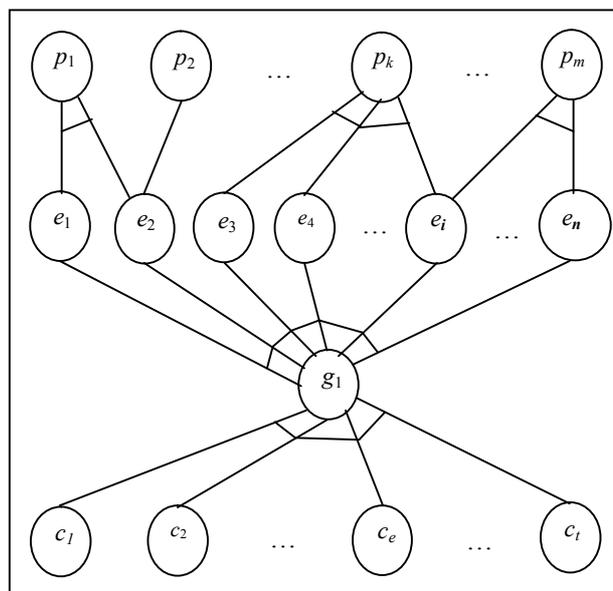


Рис. 3. Модель ЭС в виде графа

Таким образом, используемая модель позволяет:

- описывать любые объекты проектирования с учетом их иерархического характера

и различных видов связей между элементами;

- эффективно формировать, хранить и редактировать описание ансамбля вариантов в электронных базах;

- организовать формализованную процедуру синтеза (в том числе, и структуры) объекта.

ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Другой важной частью знаний ПО является совокупность знаний о процессе проектирования. Существует несколько различных представлений процесса. Наиболее распространенной является содержательная модель, реализующая принцип декомпозиции, когда единый процесс проектирования π представляется в виде совокупности $\{A_i\}$ частных задач $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m$, объединенных известным маршрутом M ,

$$\pi = \langle \{A_i\}, M \rangle. \quad (4)$$

Однако указанная трактовка процесса π проектирования из-за ряда недостатков (например, отсутствие универсальности) не может быть непосредственно использована при построении ИСАПР. Необходимо реализовать наиболее общее представление о процессе π , которое, на наш взгляд, должно описывать внутреннюю сущность проектирования как вида деятельности.

Исходя из указанного, в качестве модели процесса проектирования π при построении ИИСП использована наиболее общая модель, трактующая процесс как многократно повторяющиеся различные виды деятельности: синтез, анализ, принятие решения, названная семантической моделью [2].

С учетом введенной ранее системной модели ЭС, далее сформулировано множество типовых процедур, составляющих процесс проектирования:

- синтез компоновочной подсистемы S_K , в свою очередь распадающийся на процедуры синтеза принципов P_K , состава элементов E_K , синтез компоновочной схемы g_K , синтез параметров C_K компоновки;

- синтез механической подсистемы S_M и т.д. Однако введенные модели ЭС и процесса не дают возможности определить последовательность, маршрут M выполнения установленного набора типовых процедур.

Из-за сложности одновременного проектирования подсистем $S_{ЭМ}, S_T, S_M, S_K$ реально возможно последовательное или последовательно-параллельное проектирование. Далее сделан вывод о том, что последовательность

M выполнения процедур должна определяться условием минимальной неопределенности в информации (исходных данных) для реализации очередной типовой процедуры проектирования. Исходя из принятого условия выявляется типовая практическая стратегия проектирования ЭС, которая, в каждом конкретном случае, корректируется в зависимости от совокупности имеющихся исходных данных $Z_{ид}$ о проектной ситуации с получением собственного рабочего перечня решаемых задач $A = \{A_i\}$ и своего маршрута проектирования M

$$\pi = \{Z_{ид}, \{A_i\}, M\}. \quad (5)$$

Таким образом, семантическая модель отличается универсальностью и возможностью выявить сущность проектирования. Использование модели в сочетании с введенным системным представлением об объекте проектирования позволяет систематизировать знания о процессе проектирования с выработкой маршрутов проектирования любых объектов [3] и, кроме того, получить метазнание для построения ИСАПР.

При разработке прототипа электронной версии ИСАПР предлагается и реализовывается модель знаний эксперта [4] в виде совокупности Φ фактов и правил Π продукции типа

$$\text{“ЕСЛИ факт } \langle \phi_i \rangle, \text{ то факт } \langle \phi_j \rangle\text{”}, \quad (6)$$

как наиболее полно отвечающая условиям задачи моделирования знаний проектировщиков при построении базы знаний экспертной системы.

Особенность реализации общего подхода в данном случае состоит в необходимости учета группирования многих фактов и иерархической структуры порций знаний. Поэтому в качестве фактов выступают иерархические квазифреймовые образования (рис. 4).

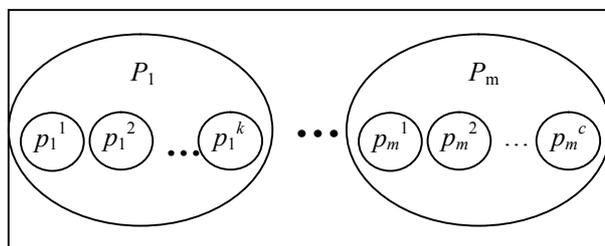


Рис. 4. Фрейм «Принципы защиты ЭС от помехи»: P_1 – принципы изоляции; $P_1 = \{p_1^1, p_1^2, p_1^3\}$; p_1^1 – отражение; p_1^2 – поглощение; p_1^3 – компенсация; P_2 – принцип повышения устойчивости ЭС; p_2^1 – изменение геометрии ЭС; p_2^2 – выбор материала ЭС; и т. д.

Другой особенностью моделируемых знаний субъекта является необходимость учета степени их неопределенности. В реализуемой версии ИСАПР это достигается введением вероятности W существования фактов F и правил P .

Таким образом, учет субъекта проектирования реализован, во-первых, в виде сформулированных экспертом множества фактов-условий U_{Σ} , фактов-ограничений O_{Σ} , правил P_{Σ} использования соответствующих порций информации (знаний) базы знаний, во-вторых, в виде учета знаний проектировщика-пользователя Z_{Π} при выборе оптимального маршрута M проектирования. Последнее выполняется за счет двухэтапной процедуры поиска решений; причем на одном из них – сценарии – реализуется систематизированный ввод необходимой и достаточной для работы экспертной системы порции знаний Z_{Π} субъекта-пользователя.

В итоге, введенное модельное представление о субъекте позволяет систематизировано учитывать при проектировании, как совокупность эвристических знаний опытных разработчиков, так и конкретных пользователей. Кроме того, указанные знания могут храниться, пополняться, редактироваться и тиражироваться. Особо нужно отметить то, что эвристические знания опытных разработчиков могут быть использованы при обучении.

Дальнейшие исследования позволяют разработать базы знаний для решения некоторых типовых задач конструкторского проектирования ЭС. Базы содержат блоки знаний «ГЗ», «Результат», «Знания эксперта». Знания о «Результате» содержат информацию о «Принципах», «Элементах», «Схемах» и «Параметрах» конструктивного решения.

Практическая реализация концепции в настоящее время представлена разработанными прототипами специализированных экспертных систем (СЭС), которые используются как при решении конструкторских задач, так и в виде сетевых

учебно-методических комплексов для обучения проектированию конструкций ЭС.

Построено несколько прототипов СЭС, с помощью которых решаются задачи поиска предварительного варианта конструкции, обеспечения защищенности ЭС от механических и тепловых воздействий и для обучения проектированию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый подход к моделированию знаний предметной области проектирования ЭС для построения ИСАПР, основанный на концепции систематического учета знаний опытных разработчиков и формализованного представления знаний предметной области. Предлагаются подход и его реализация в виде прототипов специализированных экспертных систем (СЭС) для решения некоторых задач конструкторского проектирования ЭС в ИСАПР.

Подход позволяет объединить и систематизировать известные и выявлять новые знания, как по отдельным составным частям предметной области, так и в целом методологии проектирования, повышать эффективность процесса проектирования и обучения проектированию, а в конечном итоге, повысить качество ЭС и снизить затраты на проектирование.

Литература

1. Колуков, В. В. Об оптимальном техническом проектировании МЭА на основе базовых конструкций [Текст] / В.В. Колуков // Труды МЭИ. – 1980. - Вып. 498. С. 46-52.
2. Колуков, В. В. Конструкторское проектирование РЭС в интеллектуальной САПР [Текст] / В.В. Колуков // Журнал ВНИИМИ. 1997. Вып. 1-2. С. 12-16.
3. Колуков, В. В. Проектирование электронных систем на основе синтеза и принятия решений [Текст] / В.В. Колуков // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. № 8. с 45-48.
4. Колуков, В.В. Формализация разнородной информации в САПР [Текст] / В.В. Колуков, Ю.С. Сахаров, А.В. Муратов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. Т. 10. - №2. С.28-31.

Московский технологический университет – Московский государственный университет приборостроения и информатики
Воронежский государственный технический университет

ADAPTIVE INTELLIGENT DESIGN ELECTRONIC MEANS

V.V. Kolukov, Candidate of Technical Sciences, Assistant professor, Moscow Technological Institute - Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, Moscow, Russian Federation, e-mail: vvkolukov@mail.ru
Yu.S. Sakharov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Technological Institute - Moscow State University of Instrument Engineering and Computer Science, Moscow, Russian Federation, e-mail: sakharovu@yandex.ru

V.N. Kostrova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kostrova_v@mail.ru

The approach to the creation of intelligent CAD (ISAPR) electronic means (ES), is to develop a model of the domain knowledge, based on the formation of a plurality of elements of the relationship and its graph representation. Also offered a semantic model that allows to systematize the knowledge of the object of design with the development of routes designing electronic means. The approach and its implementation in the form of prototypes of specialized expert systems (SES) to solve problems in construction engineering ES ISAPR - preliminary design options Search, providing ES protection against mechanical and thermal influences and learning design. This approach allows you to combine and organize well-known and to identify new knowledge, both in the individual components of the subject area, and the whole design methodology, to improve the efficiency of the design process and training design, and ultimately, improve the quality of the ES and reduce the cost of the design

Key words: Intelligent CAD, design, modeling, electronic means, expert systems

References

1. Kolukov V.V. Ob optimalnom texnicheskom proektirovanii MEA na osnove bazovix konstrukcii [On optimal technical design of MEA based on the basic structures] // Proceedings of the MEI. - 1980. - Vol. 498. pp 46-52.
2. Kolukov V.V. Konstruktorskoe proektirovanie RES v intellektualnoi SAPR [Design Design RES intellectual CAD] // Journal VNIIMI. 1997. Vol. 1-2. S. 12-16.
3. Kolukov V.V. Proektirovanie elektronnix sistem na osnove sinteza i prinyatiya reshenii [Designing electronic systems on the basis of synthesis and decision making] // Electromagnetic-magneticwaves and electronic systems. - 2006. 8. number from 45-48.
4. Kolukov V.V., Sakharov Y.S., Muratov A.V. Formalizaciya raznorodnoi informacii v SAPR [The formalization of heterogeneous-term information in the CAD] // Bulletin of Voronezh State. tehn. Univ. - 2014. T. 10. - №2. S.28-31.

ВЕРИФИКАЦИЯ И ТЕСТИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

А.Д. Данилов, В.М. Мугатина

Методы и приемы тестирования программных продуктов должны подвергаться постоянному развитию и совершенствованию в связи с неоспоримой важностью обеспечения должного контроля качества разрабатываемых или поддерживаемых программных систем. В данной статье выделены основные уровни тестирования программных продуктов с целью классификации методов тестирования на каждом из представленных уровней. Проведен анализ этапов и методов тестирования программного обеспечения.

В работе также рассмотрены два основных подхода к тестированию: ручное и автоматизированное, выделены характерные черты каждого из подходов. Для автоматизированного тестирования определены уровни автоматизации. Выделены преимущества и недостатки автоматического тестирования в сравнении с ручным тестированием.

В качестве способа устранения существующих недостатков применения автоматизированного тестирования в статье предложен подход, в основе которого лежит использование искусственных нейронных сетей. Рассмотрена структура искусственной нейронной сети и модель обучения.

В работе представлена нейросетевая модель, применяемая в задаче автоматического тестирования и верификации сложных программных систем. Предложен подход использования искусственной нейронной сети для проведения регрессионного тестирования. Обусловлена необходимость использования нейронных сетей при создании тестовых скриптов для автоматического тестирования

Ключевые слова: тестирование программного обеспечения, автоматическое тестирование, нейронные сети, регрессионное тестирование

Введение

Усовершенствование приемов и методов тестирования сложных программных продуктов заслуживает большого внимания со стороны компаний, занимающихся разработкой программного обеспечения (ПО), в связи с неоспоримой важностью предоставления должного уровня качества выпускаемого ПО.

Тестирование как основной способ контроля качества программных решений может быть определено как процесс исполнения программы с целью проверки соответствия между реальным и ожидаемым ее поведением. Тестирование осуществляют на конечном наборе тестовых случаев, выбранных определенным способом. В наиболее общем случае процесс тестирования может быть представлен совокупностью четырех основных активностей: планирование работ, разработка тестов, их выполнение и анализ результатов проверки ПО.

Уровни тестирования

На протяжении жизненного цикла разработки и сопровождения программного обеспечения тестирование осуществляется на разных его уровнях. Уровень определяет, какой объект или элемент тестируемого продукта рассматривается в ходе проверки. Принято выделять четыре типовых уровня тестирования (представлены на рис. 1).

Модульное тестирование рассматривает отдельный блок программы или приложения как наименьшую функциональную их часть, не способную функционировать отдельно, а только в

совокупности с другими модулями. Таким образом, модульное тестирование предполагает испытание программы на объектном уровне.



Рис. 1. Основные уровни тестирования ПО

Тестирование на интеграционном уровне служит для проверки взаимодействия нескольких модулей в связке друг с другом. Наиболее распространены такие пошаговые подходы интеграционного тестирования как «Сверху вниз» (представлен на рис. 2) и «Снизу вверх» (рис. 3).

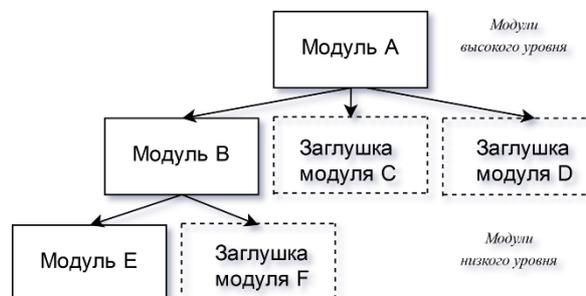


Рис. 2. Шаги при нисходящем тестировании

Если для проверки работоспособности ПО используется нисходящее тестирование, в первую очередь рассматриваются высокоуровневые модули программы, на дальнейших шагах – модули, располагающиеся на более низких уровнях архитектурной схемы программы. Для корректного тестирования проверяемого модуля подключаются вспомогательные классы-заглушки, выполняющие функцию замещения реальных классов уровнем ниже рассматриваемого. По мере готовности классы-заглушки заменяются реальными активными компонентами. Такой подход позволяет получить представление о структуре программы на промежуточных этапах тестирования, оценить организацию взаимодействия продукта с пользователем.

В случае восходящего тестирования, в первую очередь рассматриваются так называемые терминальные классы – классы, не использующие в своей работе методы других классов. Для дальнейшего тестирования выбираются такие модули, которые в ходе своего функционирования используют методы только уже протестированных классов. Важная роль отводится драйверу для каждого модуля. Драйвер содержит в себе фиксированные тестовые данные, инициализирует тестируемый модуль, получает выходные результаты тестирования и сравнивает их с ожидаемым результатом работы модуля. Недостаток использования восходящего подхода сводится к отсутствию структуры программы на промежуточных этапах тестирования, при этом данный подход обеспечивает более простую проверку результатов за счет отсутствия необходимости использовать заглушки для неготовых модулей. Восходящий подход наилучшим образом подходит для ситуаций, когда ошибки содержатся в модуле нижнего уровня.

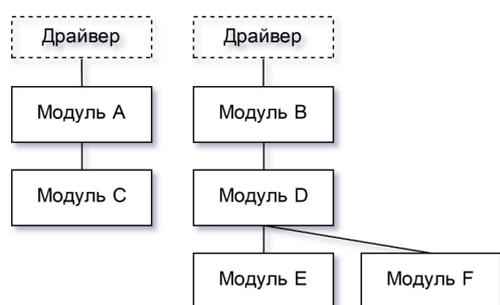


Рис. 3. Шаги при восходящем тестировании

На этапе системного тестирования весь разрабатываемый информационный продукт проверяется на наличие ошибок в функционировании при сопряжении как программных, так и аппаратных компонентов системы. На данном уровне тестируется правильность использования ресурсов системы, совместимость с окружением, полнота и корректность функциональности, удобство

использования. Для исполнения системного тестирования составляются тестовые случаи на основании предъявляемых требований к разрабатываемому продукту (технического задания) и сценариев использования системы.

Приемочное тестирование осуществляется с целью определения готовности передачи программного продукта заказчику. Приемочные испытания могут проводиться как со стороны специалистов компании, разрабатывающей ПО, так и со стороны клиента, в последнем случае подразумевается внешнее тестирование.

Подходы к тестированию

Помимо уровней тестирования принято выделять подходы к выполнению тестирования. Различают подход ручного тестирования и подход автоматического исполнения тестовых сценариев.

Задача проведения ручного тестирования определяет действия специалиста по тестированию как если бы он был пользователем разрабатываемой системы. Ручное тестирование осуществляется путем моделирования возможных сценариев активности пользователя программного продукта. Процедура, описывающая методику выполнения тестирования: набор и порядок выполнения определенных тестовых случаев, диапазон значений входных параметров, ожидаемые результаты поведения системы в каждом конкретном случае, составляется заранее и документируются. Обязательным условием успешного тестирования является четкое понимание со стороны специалиста всех пунктов указанной процедуры. Детальность описания тестового случая может быть различной, в связи с чем от специалиста по тестированию требуется гибкость в задании входных данных и при оценке нечетко сформулированных критериев результаты работы программы.

Автоматизированное тестирование является аналогом ручного, однако для выполнения тестов и оценки их результатов используются программные средства. С помощью специализированных программных инструментов осуществляется запуск тестов, инициализация, выполнение тестового сценария, дальнейший анализ и выдача результатов тестирования. Автоматизация тестирования позволяет исключить влияние человеческого фактора на качество тестирования, обеспечивая строгую однообразность выполнения тестов, гарантированное выявление ошибок при исполнении программы и четкое соблюдение шагов алгоритма каждого тестового случая. Вместе с этим автоматизация процесса тестирования значительно сокращает временные затраты, исключает потребности в сверке с техническим заданием и инструкциями, характерные для ручного тестирования. Следует отметить, что отчеты о результатах тестирования сохраняются и могут быть отправлены всем заинтересованным лицам в автоматическом режиме. Значительным

преимуществом является и тот факт, что выполнение тестов происходит без вмешательства специалиста по тестированию и не зависит от графика работы специалистов.

Выделяют три уровня автоматизации тестирования: уровень модульного тестирования, уровень функционального тестирования и уровень тестирования через пользовательский интерфейс. Каждый уровень характеризуется собственным объектом тестирования, и поэтому для обеспечения максимального качества разрабатываемого программного продукта необходимо выполнять автоматические тесты всех уровней.

В процессе модульного тестирования осуществляется автоматизированная проверка работоспособности отдельных модулей или методов исходного кода программы в изоляции от остальных частей кода. Как правило, модульные тесты создаются и исполняются самими разработчиками программы. В качестве инструмента проверки выступают unit – тесты, которые зачастую пишутся заблаговременно до написания кода программы с целью проверить корректность его работы.

Автоматизация на функциональном уровне охватывает проверку логики работы программы, которая не может быть протестирована через пользовательский интерфейс ПО. По этой причине для проведения автоматизированного тестирования на функциональном уровне специалистам группы контроля качества предоставляется доступ к функциональному слою продукта, что позволяет проверить логику работы программы в автоматическом режиме, минуя использование пользовательского интерфейса.

Уровень автоматизации тестирования через пользовательский интерфейс, который также называется GUI автоматизацией (от английского Graphical User Interface – графический интерфейс пользователя) является наиболее востребованным, так как имитирует прямые действия пользователя и не требует доступа к исходному коду программы.

Одной из техник GUI автоматизации является написание сценария – последовательности действий при взаимодействии пользователя с системой. Создание тестов при такой форме автоматизации подразумевает под собой программирование на языках, специально разработанных для указанной цели, обеспечивающих смягчение основных проблем инструментов воспроизведения и записи. Разработанные поведенческие скрипты (сценарии) применяются как для отдельных частей программного обеспечения, так и всей системы в целом. Такие скрипты симулируют работу пользователя системы.

Наряду со всеми очевидными преимуществами использования автоматизированного тестирования, такими как высокая скорость выполнения, высокая

повторяемость, надежность и независимость от длины тестового цикла, следует отметить, что автоматические методы тестирования во многих ситуациях уступают ручному тестированию. Это связано с двумя основными проблемами: сложностью написания автоматических тестов, нелинейно зависящей от сложности программного обеспечения, и отсутствием случайности в поведении тестов, отсутствием той гибкости, которую могут обеспечить специалисты при ручном методе тестирования. Для устранения указанных недостатков необходимо решить две задачи: упростить создание автотестов или создавать тестовое покрытие в автоматическом режиме и добавить случайность в поведение скриптов, исполняемых по жесткому алгоритму.

Использование нейросетевых моделей в задачах тестирования ПО

Для решения указанных задач при решении проблем автоматизированного тестирования может быть предложен метод, основывающийся на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС). На практике использование нейронных сетей показывает более чем достойные результаты в самых разнообразных приложениях. Так как программное обеспечение может быть рассмотрено в качестве функции в многомерном пространстве, для такой модели можно применять и методы нейронных сетей.

Мозг человека представляет собой чрезвычайно сложную, нелинейную, параллельную систему обработки информации, обладающую способностью организовывать свои структурные компоненты. Для того, чтобы добиться высокой производительности, нейронные сети используют множество взаимосвязей между элементарными ячейками вычислений – нейронами. Аналогичным образом в искусственных нейронных сетях работа проводится с искусственными нейронами.

Модель нейрона, лежащего в основе ИНС, представлена на рис. 4.

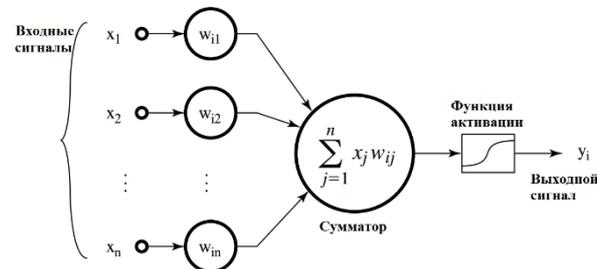


Рис. 4. Модель искусственного нейрона

Искусственные нейронные сети представляют собой систему соединённых и взаимодействующих между собой простых процессоров (искусственных нейронов), каждый из которых имеет дело с сигналами, которые он периодически получает, и сигналами, которые он периодически посылает другим процессорам. Искусственный нейрон

имитирует в первом приближении свойства биологического нейрона: на вход искусственного нейрона поступает некоторое множество сигналов, каждый из которых является выходом другого нейрона. Каждый вход умножается на соответствующий вес, аналогичный синаптической силе, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона.

Таким образом, в математическом представлении функционирование нейрона i можно описать парой уравнений:

$$net = \sum_{j=1}^n x_j w_{ij} \quad (1)$$

$$y_i = \frac{1}{1 + e^{-net}} \quad (2)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n – входные сигналы;

$w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$ – веса нейрона i ;

y_i – выходной сигнал нейрона.

Нейроны разделяются на три группы по своим свойствам: входные нейроны, выходные нейроны и нейроны скрытого слоя (вычислительные узлы).

Многоуровневая нейронная сеть прямого распространения состоит из входного слоя (один узел для каждого входного значения), одного или нескольких скрытых слоев и выходного уровня. В качестве метода обучения нейронной сети прямого распространения, как правило, используется метод обратного распространения ошибки. Алгоритм заключается в передаче входного сигнала в прямом направлении и сигнала ошибки - в обратном. При прямом проходе вектор входных сигналов подается на входной слой нейросети, после этого он постепенно распространяется по сети от одного слоя к последующему. В результате образуется набор выходных сигналов, которые представляют собой фактическую реакцию сети на входной набор. При прямом проходе все синаптические веса постоянны, а во время обратного прохода веса настраиваются в соответствии с правилом коррекции ошибок. Настройка весов происходит следующим образом: фактический выход сети вычитается из ожидаемого и формируется сигнал ошибки. Этот сигнал распространяется по сети в направлении, обратном направлению синаптических связей.

Структура описанной сети показана на рис. 5.

Фактически нейронная сеть – это особый способ задания функции. Для того, чтобы работать с ней, необходимо, в первую очередь, обучить сеть. Процесс обучения заключается в подготовке обучающей выборки, представляющей собой множество пар входных и соответствующих им заведомо верных выходных векторов. Элементы такого множества должны быть независимыми для возможности расширения выборки и представления

ее в произвольном порядке. Обучающая выборка проходит через нейронную сеть, синаптические веса в нейронных связях корректируются таким образом, чтобы определить функцию, удовлетворяющую обучающей выборке. При этом качество обучения определяет качество работы нейронной сети. Вторым этапом является проверка результата обучения сети, для чего подготавливается тестовая выборка, аналогичная обучающей, но на других значениях. Если результат тестирования будет признан неудовлетворительным, необходимо дообучить сеть или изменить ее структуру.

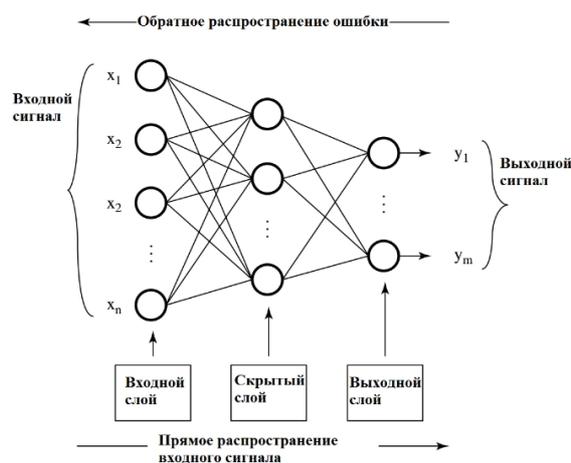


Рис. 5. Структура многослойной нейронной сети

Искусственные нейронные сети могут быть применены для решения задачи автоматизированного тестирования программного обеспечения. Были проведены эксперименты, доказывающие эффективность генерации тестовых сценариев, способных выявлять неисправности в работе ПО, при помощи искусственных нейронных сетей.

Многоуровневая нейронная сеть может быть обучена в соответствии с тестируемым приложением на основе сгенерированных в произвольном порядке входных данных для тестирования, которые соответствуют техническому заданию или спецификации. В результате обучения нейросеть способна показывать достаточную степень точности в рамках тестируемой программы. Таким образом, обученная нейронная сеть становится симулированной моделью программного продукта.

Впоследствии, когда будет доработан функционал разрабатываемого программного продукта и созданы новые версии приложения, потребуются проведение так называемого регрессионного тестирования. Данный вид тестирования направлен на проверку изменений, реализованных в приложении или окружающей среде. В качестве таких изменений может выступать новый функционал, починка дефекта, миграция на новую базу данных, операционную

систему или сервер приложений. В таком случае проводится регрессионное тестирование с целью проверки, что в новой версии приложения исправно работает существующая функциональность.

Таким образом, в случае применения в процессе тестирования искусственных нейронных сетей, при регрессионном тестировании рассматриваемый программный продукт проверяется на тестовых данных для получения выходных результатов, которые затем сравниваются с результатами нейронной сети.

Предположив, что новые версии программного продукта не изменяют существующий функционал, можно ожидать, что при одинаковых входных данных нейронная сеть и реальное приложение выдают идентичные результаты. С помощью инструмента для сравнения можно будет сделать вывод, корректен ли вывод тестируемого приложения. Описанная методика тестирования представлена на рис. 6, 7, 8.

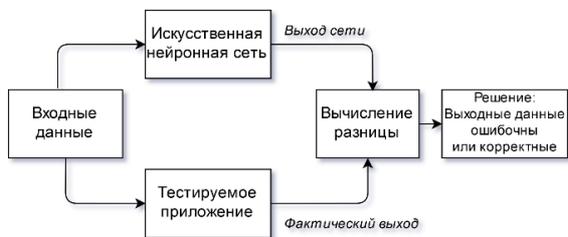


Рис. 6. Методика тестирования

Заключение

Использование основанной на искусственной нейронной сети модели программного обеспечения вместо оригинальной версии программного продукта может быть эффективным по целому ряду причин. Во-первых, оригинальная версия может стать непригодной для тестирования из-за изменений в аппаратной платформе или операционной системе.

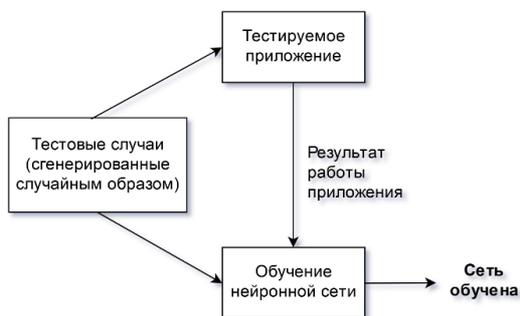


Рис. 7. Фаза обучения нейронной сети

Во-вторых, большинство пар входных и выходных данных исходного приложения может быть не критическим на данном этапе процесса тестирования, и, таким образом, использование нейронной сети для автоматизированного

моделирования исходного приложения может сохранить существенное количество компьютерных ресурсов.

В-третьих, сохранение исчерпывающего набора тестовых сценариев с выходными значениями первоначального приложения может быть неосуществимым для реальных приложений.

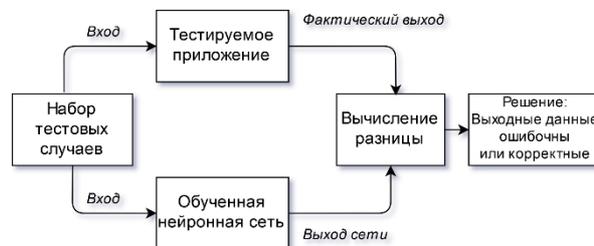


Рис. 8. Фаза тестирования

Наконец, в любом случае отсутствует гарантия того, что первоначальная версия является безошибочной. Сравнение результатов работы первоначальной и доработанной версии может пропустить случаи, где обе версии функционируют некорректно. Нейронные сети в данном случае обеспечивают дополнительный параметр для проверки надежности тестирования.

Поскольку программное обеспечение, которое сеть обучена моделировать, было обновлено до новой доработанной версии, аналогичным образом обученная нейронная сеть может учиться классифицировать и новые данные. Другими словами, нейронная сеть способна к обучению на новых версиях постоянно развивающегося программного продукта.

Помимо описанного применения искусственной нейронной сети в задаче автоматизации тестирования, могут быть рассмотрены и другие аспекты использования ИНС. Например, важной является задача генерации входных данных для тестовых случаев, которые с наибольшей степенью вероятности приведут к обнаружению ошибки в работе программного продукта.

В заключении следует отметить, что нейросетевые технологии совместно используемыми методами автоматизации тестирования способны улучшить результаты автоматического тестирования в задачах тестирования сложных программных систем.

Литература

1. Данилов А.Д. Иерархическая структура процесса тестирования сложного программного обеспечения [Текст] / А.Д. Данилов, А.И. Фёдоров // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 3-1. - С.18-21.

2. Тамре, Л. Введение в тестирование программного обеспечения [Текст] / Л. Тамре - М.: Вильямс, 2003. – 354 с.
3. Данилов, А.Д. Цифровые системы управления [Текст] / А.Д. Данилов, В.Н. Головнев - Воронеж: ГОУ ВПО; Воронежская гос. лесотехническая акад., 2007. – 235 с.
4. Литвинов В. В. Тестирование моделей объектно-ориентированного программного обеспечения [Текст] / В.В. Литвинов, И.В. Богдан // Математические машины и системы. - 2012. - Т. 1. - № 2. - С.117-125.
5. Яхьяева, Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети [Текст] / Г.Э. Яхьяева - М.: Интернет-Университет

Информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с.

6. Степанченко, И.В. Методы тестирования программного обеспечения [Текст] / И.В. Степанченко – Волгоград: ГОУ ВПО; Волгоградский государственный технический университет., 2006. – 74 с.
7. Vanmali, M. Using a neural network in the software testing process [Text] / M. Vanmali, M. Last, A. Kandel // International Journal of Intelligent Systems. - 2002. - Vol.17. - N. 1. - P.45-62.
8. Smilgyte K. Artificial Neural Networks Application in Software Testing Selection Method [Text] / K.Smilgyte, J. Nenortaite // Hybrid Artificial Intelligent Systems. - 2011. - Vol. 6678. - P.247-254.

Воронежский государственный технический университет

VERIFICATION AND TESTING OF COMPLEX SOFTWARE PRODUCTS BASED ON NEURAL NETWORK MODEL

A.D. Danilov, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: danilov-ad@yandex.ru

V.M. Mugatina, graduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: varvaramugatina@gmail.com

Methods and acceptances of software testing should be exposed to continuous development and perfection on the score of incontestable importance of ensuring due quality control of the developed or supported program systems. In this article the main levels of software testing are represented to classify basic methods of testing on each of the provided levels. An analysis of the steps and methods of software testing is carried out.

This article describes in detail basic approaches of testing: manual and automated, and principal characteristic features of them. Levels of automatization are determined for automated testing. This article determines the advantages and disadvantages of automated testing in comparison with manual testing.

The article suggests an approach based on the use of artificial neural networks as a method of elimination of the existing shortcomings of application of automated testing. The structure of an artificial neural network and model of training are considered.

As a result, the neural network model is provided for the task of automatic testing and verification of complex program systems. Approach of use of an artificial neural network for carrying out regression testing is offered. The need of use of neural networks for creation of test scripts for automatic testing is caused

Key words: software testing, software automation testing, neural networks, regression testing

References

1. Danilov A. D., Fyodorov A.I. Ierarhicheskaya struktura processa testirovaniya slozhnogo programmogo obespecheniya [The hierarchical structure of the process of testing complex software], Vestn. Voronezh. Gos.Tech. Univ.2014.,vol.10., no.3-1, pp.18-21.
2. Tamre L. Vvedenie v testirovanie programmogo obespecheniya [Introduction to Software Testing], Moscow: Vilyams, 2003.
3. Danilov A. D., Golovnev V.N. Cifrovye sistemy upravleniya [Digital control systems], Voronezh, 2007.
4. Litvinov V. V., Bogdan I. V. Testirovanie modelej obektno-orientirovannogo programmogo obespecheniya [Test models of object-oriented software], Mathematical Machines and Systems. 2012., vol.1., no.2, pp.117-125.
5. Yahyaeva G. EH. Nechetkie mnozhestva i nejronnye seti [Fuzzy sets and neural networks], Moscow, 2006.
6. Stepanchenko I.V. Metody testirovaniya programmogo obespecheniya [Software Testing Methods], Volgograd, 2006.
7. Vanmali. M., Last M., Kandel A. Using a neural network in the software testing process // International Journal of Intelligent Systems. - 2002. - Vol.17. - N. 1. - pp.45-62.
8. Smilgyte K., Nenortaite J. Artificial Neural Networks Application in Software Testing Selection Method // Hybrid Artificial Intelligent Systems. - 2011. - Vol. 6678. - pp.247-254.

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ПОЛОЖЕНИЕМ В РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЕ

В.В. Горячко, В.Н. Кострова, И.Я. Львович

В настоящее время актуальным является вопрос конкурентоспособности российских вузов, определение их слабых и сильных сторон с целью участия как в национальных, так и в мировых рейтингах. В этой связи, в статье рассматривается подход к формированию многоэтапной процедуры выбора показателей эффективности деятельности вуза для управления его положением в рейтинговом списке, основанной на интеграции экспертной и формализованной информации (включающей экспертную оценку целесообразного числа позиций повышения рейтинга); ранжировании показателей, входящих в набор, и вероятностной интерпретации рангов; формировании оптимизационной модели и ее погружении в рандомизированную среду; интеграции вероятностного экспертного оценивания и решения задачи в рандомизированной среде; формулировании множества доминирующих вариантов набора показателей, определяющих переход на более высокую позицию вуза в рейтинге, и экспертного выбора окончательного варианта. Поскольку в данных рейтинга агрегируется информация по определенным значениям показателя эффективности по разным направлениям деятельности университета и его итогом являются ранги, присвоенные вузам по интегральной оценке, возникает возможность анализа положения рассматриваемой образовательной организации на рейтинговой шкале и принятия управленческих решений по созданию условий изменения значений ранга в направлении, характеризующем продвижение на более высокую позицию. Сравнение вуза, характеризующегося определенным рангом, с вузами, имеющими более высокий ранг, осуществляется по некоторым наборам значений показателей

Ключевые слова: экспертная оценка, рейтинг, ранг, ранжирование, рандомизированная среда

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в международном образовательном пространстве всю большую значимость приобретают системы рейтингового оценивания деятельности университетов [1]. В настоящее время формируется платформа национального рейтинга для российских вузов [2], задачей которого является повышение конкурентоспособности как внутри страны, так и в мире с возможностью определения слабых и сильных сторон в продвижении на более высокие позиции.

Предполагаются следующие направления изменения деятельности: образование, наука, интернационализация, устойчивость развития, связь с регионом, взаимодействие с индустрией. Такой подход создает предпосылки для управления эффективностью деятельности вуза на основе результатов рейтингового оценивания.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поскольку в данных рейтинга агрегируется информация по f_{ijk} значениям показателя эффективности по разным направлениям деятельности университета (i – индекс, характеризующий множество вузов, участвующих в рей-

тинговании, $i = \overline{1, I}$, j_k – номер показателя по k -му направлению деятельности, $j_k = \overline{1, J_k}$, $k = \overline{1, K}$) и его итогом являются ранги, присвоенные вузам по интегральной оценке $r_j = \overline{1, R}$, возникает возможность анализа положения i -й образовательной организации на рейтинговой шкале и принятия управленческих решений по созданию условий изменения значений ранга r_i в направлении r_{i-t} , $t = \overline{1, T}$ – дискретный набор целых чисел, характеризующих продвижение на более высокую позицию.

Сравнение вуза, характеризующегося рангом r_i , с вузами, имеющими более высокий ранг r_{i-t} , осуществляется по двум наборам значений показателей $f_{jk}(r_i)$ и $f_{jk}(r_{i-t})$, $j_k = \overline{1, J_k}$, $k = \overline{1, K}$.

При этом определяются показатели f_{yk}^t , для которых $f_{jk}(r_i) < f_{jk}(r_{i-t})$.

С учетом того, что при вычислении интегральных оценок по наборам показателей используются в большей степени аддитивные свертки [3], увеличение значения показателя f_{yk}^t для i -го вуза до уровня $f_{yk}^t(r_{i-t})$ создает предпосылки для его перехода в рейтинге на более высокую позицию. Разные показатели из числа f_{yk}^t , с другой стороны, в разной степени доступны i -му вузу по его ресурсным возможностям, а с другой – в разной мере влияют на изменение положения при рейтинговании в следующем календарном периоде. Поэтому

Горячко Вячеслав Вячеславович – МГУ им. М.В. Ломоносова, руководитель аппарата Российского союза ректоров, e-mail: office@rsr-online.ru
Кострова Вера Николаевна – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: kostrova_v@mail.ru
Львович Игорь Яковлевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: i_lvovich@mail.ru

первой процедурой принятия управленческих решений по переходу на более высокую рейтинговую позицию является процедура выбора именно тех показателей эффективности деятельности из набора f_{ij}^t , которые в наибольшей степени ориентированы на решение такой задачи.

ПРОЦЕДУРА ВЫБОРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗА

С целью реализации выбора предполагается использовать многоэтапную процедуру, базирующуюся на совмещении экспертной и формализованной информации.

Этап 1. Экспертная оценка целесообразного числа позиций t^* повышения рейтинга r_i .

Рассматриваются наборы f_{ij}^t для всех $t = \overline{1, T}$, наборы отклонений $\Delta f_{ij}^t = f_{ij}^t(r_i - t) - f_{ij}^t(r_i)$ и на основе этой информации эксперт выбирает целесообразное число позиций t^* , исходя из анализа условий развития вуза, позволяющих компенсировать отклонения Δf_{ij}^t . Предполагается, что при достижении в течение следующего календарного периода значений показателей $f_{ij}^{t^*}(r_i - t^*)$ и сохранении значений остальных показателей на уровне $f_{ij}(r_i)$, обеспечивается возможность перехода на более высокую позицию в рейтинге.

Этап 2. Ранжирование показателей, входящих в набор $f_{ij}^{t^*}$, и вероятностная интерпретация рангов.

Обозначим показатели, входящие в набор $f_{ij}^{t^*}$ индексами $m = \overline{1, M}$. Проведем экспертное априорное ранжирование [4] показателей f_m , $m = \overline{1, M}$ по степени их значимости для перехода на более высокую позицию при ограниченных ресурсах на развитие вуза. В результате получим величины рангов a_m , $m = \overline{1, M}$. При вероятностной интерпретации ранговой оценки будем учитывать, что наиболее значимому показателю соответствует наименьшее дискретное значение величины ранга. Исходя из этого, получим следующее распределение случайной величина, характеризующей номера показателей, $m = \overline{1, M}$:

$$P_m^y = \frac{1/a_m}{\sum_{m=1}^M 1/a_m}, \quad m = \overline{1, M}, \quad \sum_{m=1}^M P_m^y = 1. \quad (1)$$

Для вероятностной интерпретации результатов ранжирования недостаточно иметь только распределение (1), требуется установить, с какой вероятностью эксперт выбирает влияние на переход на более высокую позицию в рейтинге показателя f_m , то есть $P^3(f_m)$. Если величина $P^3(f_m) < 0.5$, то влияние менее достаточное, при $P^3(f_m) > 0.5$ – более достаточное.

Этап 3. Формирование оптимизационной модели и ее погружение в рандомизированную среду.

С учетом этого, что выбор большего числа показателей, по которым необходимо компенсировать отклонения $\Delta f_{ij}^{t^*}$, предполагаем привлечение большего объема ресурсного обеспечения, их число необходимо минимизировать, сохранив не менее одного по каждому из направлений деятельности. Такому разбиению множества показателей на две группы соответствует следующая модель многоальтернативной оптимизации [5]:

$$\sum_{m=1}^M x_m \rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M C_{mk} x_m \geq 1, \quad k = \overline{1, K},$$

$$x_m = \begin{cases} 1, & m = \overline{1, M}, \\ 0, & \end{cases}$$

где x_m – альтернативные переменные,

$$x_m = \begin{cases} 1, & \text{если показатель } f_m \text{ используется для} \\ & \text{перехода на более высокую позицию} \\ & \text{в рейтинге,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

C_{mk} – булевый коэффициент,

$$C_{mk} = \begin{cases} 1, & \text{если показатель } f_m \text{ относится к } k\text{-му} \\ & \text{направлению,} \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

Ориентируясь на вероятностную интерпретацию экспертных оценок на этапе 2, их интеграция с решением оптимизационной задачи (2) требует ее погружения в адекватную вероятностным характеристикам P_m^y и $P^3(f_m)$ рандо-

мизированную среду. С этой целью перейдем к случайным альтернативным переменным:

$$\tilde{x}_m = \begin{cases} 1, & \text{с распределением, характеризующим} \\ 0, & \text{принятие решений 1 или 0,} \end{cases}$$

$$P(\tilde{x}_m = 1) = P_{x_m}, P(\tilde{x}_m = 0) = q_{x_m}, \quad (3)$$

$$P_{x_m} + q_{x_m} = 1$$

и распределением, характеризующим участие в решении задачи (2) переменной x_m ,

$$P_m, m = \overline{1, M}, \sum_{m=1}^M P_m = 1. \quad (4)$$

Этап 4. Интеграция вероятностного экспертного оценивания и решения задачи (2) в рандомизированной среде.

В этом случае реализуются $n = \overline{1, N}$ итераций направленного случайного поиска [6]. Значения вероятностей (3) и (4) на первом шаге принимаются на основе вероятностных характеристик экспертного оценивания этапа 2:

$$P_{x_m}^1 = P^y(f_m); P_m^1 = P_m^y.$$

От начальных значений вероятностей зависит эффективность поиска, поэтому экспертные оценки играют существенную роль. Для построения процедур настройки значений вероятностей на последующих шагах $n > 1$ используются вариации функции, эквивалентной задаче оптимизации (2):

$$\begin{aligned} \Delta_m^n F &= \left(\sum_{m=1}^M \tilde{x}_m / x_v = 0 \right) - \sum_{m=1}^M \tilde{x}_m / x_v = 1 + \\ &+ \sum_{k=1}^K y_k^n \left(\sum_{m=1}^M C_{mk} \tilde{x}_m / x_v = 1 - 1 \right) + \\ &+ \sum_{k=1}^K y_k^n \left(\sum_{m=1}^M C_{mk} \tilde{x}_m / x_v = 0 - 1 \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где \tilde{x}_m - набор случайных значений переменной x_m , $m = \overline{1, M}$, $m \neq v$;

y_k^n - множители эквивалентной функции F, которые для очередной итерации определяются следующим образом [4]

$$y_k^{n+1} = \min \{ 0, y_k^n - \gamma_k^{n+1} \left(\sum_{m=1}^M C_{mk} x_m^n - 1 \right) \},$$

γ_k^{n+1} - величина шага, выбираемая экспертом,

x_m^n - значения альтернативных переменных на n -й итерации, выбранные в соответствии с вероятностями $P_{x_m}^n$

$$x_m = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{x_m}^n \geq 0.5, \\ 0, & \text{если } P_{x_m}^n < 0.5. \end{cases}$$

Вычисление трех случайных реализаций приращения (5)

$$\Delta_m F^{(1)}, \Delta_m F^{(2)}, \Delta_m F^{(3)}$$

позволяет определить распределение вероятностей (3), (4) для очередной $(n+1)$ -й итерации [6]

$$P_{x_m}^{n+1} = \varphi(\Delta_m^n F^{(1)}, \Delta_m^n F^{(2)}, P_m^{n+1}), \quad (6)$$

$$P_m^{n+1} = \varphi(\Delta_m^n F^{(1)}, \Delta_m^n F^{(3)}).$$

Этап 5. Формулирование множества доминирующих вариантов набора показателей, определяющих переход на более высокую позицию вуза в рейтинге, и экспертный выбор окончательного варианта.

В процессе поиска в соответствии с алгоритмом (6) выявляются $l = \overline{1, L}$ вариантов решения задачи (2) S_l . Интерпретируем переходы от варианта $l_1 \in \overline{1, L}$ к $l_2 \in \overline{1, L}$ как случайное блуждание в рандомизированной среде (3), (4), отвечающее некоторой конечной марковской цепи с переменной переходной матрицей [7]:

$$P^N = \| P_{l_1 l_2}^N \|, l_1, l_2 = \overline{1, L}.$$

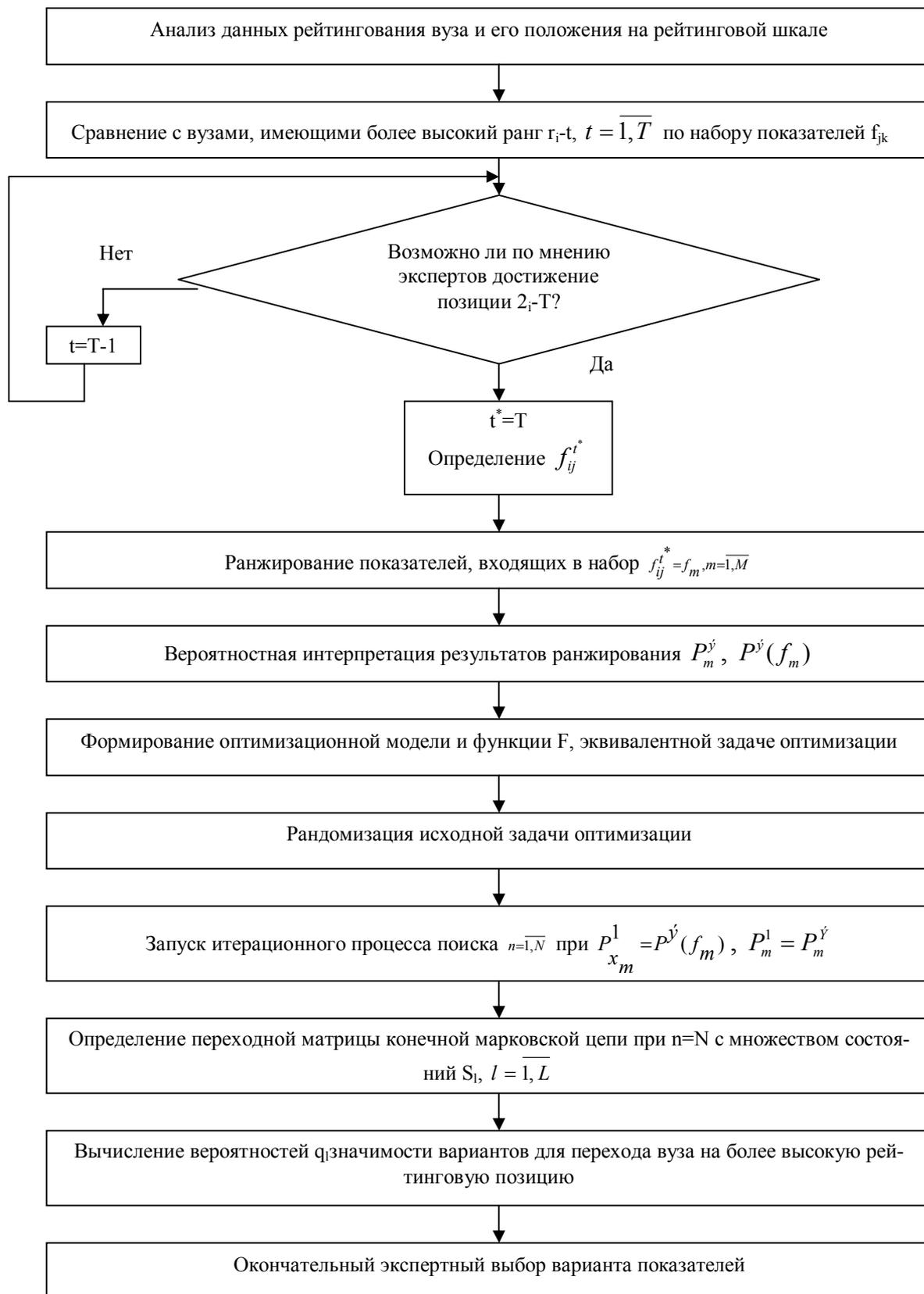
В [5] показано, что марковская цепь с множеством состояний S_l , $l = \overline{1, L}$ и вероятностями перехода $P_{l_1 l_2}$ обладает рядом свойств [7], которые позволяют вычислять вероятности q_l выбора варианта l в качестве доминирующего.

Распределение q_l , $l = \overline{1, L}$, $\sum_{l=1}^L q_l = 1$, предъявляется эксперту.

Структурная схема многоэтапной процедуры приведена на рисунке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эксперт рассматривает варианты, характеризующиеся наибольшими значениями вероятностей, и принимает окончательное решение о выборе набора показателей, которые будут использованы в течение очередного календарного периода как ключевые для перехода вуза на более высокую позицию в рейтинге.



Структурная схема многоэтапной процедуры выбора показателей эффективности деятельности вуза для управления его положением в рейтинговом списке

Литература

1. Зернов, В.А. Оптимизация развития негосударственного сектора высшего образования на основе результатов мониторинго-рейтингового оценивания [Текст] / В.А. Зернов, Я.Е. Львович, С.О. Сорокин // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Проблемы высшего образования. – 2014. - № 4. – С. 22-26.
2. Зернов, В.А. Конкурентоспособность отечественной системы высшего образования [Текст] / В.А. Зернов // Проблемы теории и практики управления. – 2014. - № 4. – С. 36-40.
3. Батищев, Д.И. Оптимизация в САПР [Текст] / Д.И. Батищев, Я.Е. Львович, В.Н. Фролов. – Воронеж: Изд-во Воронежского госуниверситета. – 1997. – 416 с.

4. Львович, И.Я. Информационные технологии моделирования и оптимизации: краткая теория и приложения [Текст] / И.Я. Львович, Я.Е. Львович, В.Н. Фролов. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2016. – 444 с.

5. Львович, Я.Е. Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения [Текст] / Я.Е. Львович. – Воронеж: ИД «Кварта», 2006. – 426 с.

6. Львович, Я.Е. Принятие решений в экспертно-виртуальной среде [Текст] / Я.Е. Львович, И.Я. Львович. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2010. – 140 с.

7. Кемени, Дж. Конечные цепи Маркова [Текст] / Дж. Кемени, Дж. Снелл: пер. с англ. под ред. А.А. Юшкевича. – М.: Наука, 1970. – 271 с.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Воронежский государственный технический университет

ALGORITHMIZATION SELECTION OF UNIVERSITY PERFORMANCE INDICATORS FOR CONTROL ITS POSITION IN THE RATING SYSTEM

V.V. Goryachko, Chief of Staff of the Russian Union of Rectors, Moscow State University, Moscow, Russian Federation, e-mail: office@rsr-online.ru

V.N. Kostrova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kostrova_v@mail.ru

I.Ya. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: i_lvovich@mail.ru

Currently relevant is the question of the competitiveness of Russian universities to determine their strengths and weaknesses in order to participate in the national and in the world rankings. In this regard, the article examines the approach to the formation of a multi-stage procedure, the choice of performance indicators for the management of universities by its position in the ranking list, based on integration of expert and formalized information, including: the expert assessment of the feasibility of increasing ranking positions; ranking the indicators included in the set, and the probabilistic interpretation of the ranks; the formation of the optimization model and its immersion in a randomized environment; integration and expert estimation of the probability of solving the problem in a random environment; the formulation of the set of dominant variants set of indicators that define the transition to a higher position in the ranking of the university, and an expert selection of the final version. Since these rankings aggregated information about specific values of an indicator of efficiency in different areas of the University's activities and its outcome are the grades assigned to universities for an integrated assessment, it becomes possible to analyze the situation of the considered educational organization in the rating scale and management decisions to create conditions rank values change in direction characterizing the promotion to a higher position. Comparison of the university, characterized by a certain rank, with universities having a higher rank is carried out on a certain set of parameters values

Key words: expert evaluation, ranking, rank, ranking, randomized environment

References

1. Zernov V.A., Lvovich Y.E., Sorokin S.O. Optimizatsiya razvitiya negosudarstvennogo sektora visshogo obrazovaniya na osnove rezultatov monitoringo-reitingovogo ocenivaniya [Optimizing the development of the private higher education sector on the basis of the results of monitoring and evaluation of the rating] // Bulletin of Voronezh State University. Series: Issues of Higher Education. - 2014. - № 4. - С. 22-26.

2. Zernov V.A. Konkurentosposobnost otechestvennoi sistemi visshego obrazovaniya [The competitiveness of the national higher education system] // Problems of the theory and practice of management. - 2014. - № 4. - S. 36-40.

3. Batishchev D.I., Lvovich Y.E., Frolov V.N. Optimize CAD. - Voronezh: Publishing house of the Voronezh State University. - 1997. - 416 p.

4. Lvovich I.Y., Lvovich Y.E., Frolov V.N. Information Technology Simulation and Optimization: A Brief Theory and Applications. - Voronezh: CPI "Scientific Book", 2016. - 444 p.

5. Lvovich Y.E. Multialternative Optimization: Theory and Applications. - Voronezh: ID "Quart", 2006. - 426 p.

6. Lvovich Y.E., Lvovich I.Y. Decision-making in a virtual environment expert and. - Voronezh: CPI "Scientific Book", 2010. - 140 p.

7. Kemeny G., Snell J. Finite Markov Chains: Per. from English. ed. AA Yushkevich. - M.: Nauka, 1970. - 271 p.

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ ЖРД К ОТКАЗАМ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ

С.М. Пасмурнов, Д.Ю. Якуш

Устойчивость работы системы аварийной защиты и управления к отказам средств измерения - одна из важнейших характеристик, влияющих на ее эффективность. Мероприятия по повышению устойчивости весьма разнонаправлены. За рамками статьи находится рассмотрение задач формирования технических требований к каналам измерения, выбора аппаратной части системы измерения, датчиков, алгоритмов обработки сигналов от первичных преобразователей до перехода к физической размерности параметров и т.д. Рассмотрен перечень программных возможностей системы аварийной защиты и управления, позволяющий распознать отказы измерительных средств и общие требования к настройке алгоритмов, реализующих данную задачу. В работе определена основная задача цензурирования, состоящая в защите от ложных решений при независимых отказах датчиков (каналов) измерения параметра в том случае, когда в результате предшествующих отказов датчиков (каналов) схема резервирования измерения данного параметра исчерпана. Кроме того, цензор выполняет функцию защиты от ложных решений при аппаратных отказах, когда имеют место одновременные отказы всех или большинства каналов измерения данного параметра. Обеспечение максимальной устойчивой работы системы аварийной защиты и управления ЖРД к отказам средств измерения требует применения комплексных методов защиты

Ключевые слова: система аварийной защиты и управления, программно-математическое обеспечение, диагностический алгоритм, недостоверные измерения, жидкостные ракетные двигатели

Введение. Существенные трудности при создании системы аварийной защиты и управления жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) вызваны необходимостью работы в режиме жесткого реального времени (постоянные времени объектов контроля составляют порядка 0,01 с), технической сложностью и высокой стоимостью как объектов контроля, так и самих испытаний. Эти факторы ставят задачу одновременной реализации таких антагонистичных требований, как ограничения по объему вычислений и надежность распознавания возможных аварийных ситуаций, быстрота реакции на возникновение аварийной ситуации и минимизация вероятности выдачи ложных команд.

Основной раздел. Основными исходными данными для анализа работоспособности ЖРД являются значения его параметров и состояние исполнительных органов. Данную информацию получают при помощи измерительных средств. В процессе испытания она поступает в систему аварийной защиты и управления, ее обновление происходит на каждом такте работы системы. В ряде случаев из-за отказов датчиков, влияния помех, сбоев в аппаратуре и программном обеспечении системы измерения и т.п. эта информация содержит недостоверные данные.

Статистика отказов средств измерения свидетельствует о том, что они могут проявляться как внезапные или постепенные, полные или частичные, очевидные (явные) или скрытые (неявные), устойчивые отказы или

самоустраняющиеся отказы и сбои, независимые отказы или коррелированные. В соответствии с этим, отклонения результатов измерений от реальных значений контролируемых параметров могут возникать внезапно (скачок параметра) или постепенно (дрейф параметра), могут выражаться как утрата измерительных функций («обрыв», «КЗ», отсутствие стабильных показаний) или как повышенная погрешность измерения, как устойчивое изменение уровня сигнала или как перемежающиеся отклонения, как разновременные отклонения по отдельным каналам измерения или как одновременные отклонения по совокупности каналов (например, при отказах многоканальных аппаратных блоков системы измерения, или при повреждениях датчиков вызванных аномалиями рабочего процесса двигателя, как в случае возгорания термоспаев многоканального термометра).

Для обеспечения защиты от ложных решений из-за отказов средств измерения система аварийной защиты и управления имеет следующий набор методов:

а) Мажоритарная схема выбора параметра из совокупности одноименных одновременных измерений в алгоритмах подготовки информации.

б) Цензурирование: применение алгоритмов – обнаружителей отказов измерительных средств системы аварийной защиты и управления, которые отключают из режима контроля алгоритмы, использующие параметры, признанные цензорами недостоверными.

в) Цифровая фильтрация (осреднение) в диагностических алгоритмах и/или в алгоритмах подготовки информации.

Пасмурнов Сергей Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, профессор, e-mail: smpasmurnov@mail.ru
Якуш Дмитрий Юрьевич – ВГТУ, аспирант; АО КБХА, вед. конструктор, e-mail: duyakush@mail.ru

г) Мажоритарная схема формирования сигнала аварийности по последовательности и совокупности решений диагностических алгоритмов.

д) Штрафование диагностических алгоритмов: отключение алгоритма по набору заданного числа выходов его на аварийную ветвь, не подтвержденных повторением его срабатывания или срабатыванием других алгоритмов.

е) Применение пакетов, предназначенных для оценки входной информации от системы измерения

Рассмотрим данные методы подробнее.

Мажоритарная схема выбора параметра

Процедура выбора параметра из совокупности одноименных одновременных измерений в алгоритмах подготовки информации исключает влияние на принятие решения независимых отказов любого вида во всех случаях, когда не исчерпана схема резервирования датчиков (каналов): при сохранении не менее двух кондиционных датчиков (каналов) измерения данного параметра.

В номенклатуре алгоритмов подготовки данных присутствует алгоритм сортировки выборки параметра, который специально разработан для отбраковки наиболее недостоверных значений параметров.

Выходом алгоритма сортировки выборки параметра служит значение, являющееся максимальным, субмаксимальным, субминимальным, минимальным, в зависимости от настройки алгоритма в конкретной версии программно-математического обеспечения.

Например, при работе над троированным параметром и настройке алгоритма на субминимум его выходом является срединное значение.

$Par = \text{submin}(Par1, Par2, Par3)$

$Par = \text{submin}(12, 4, 2) = \text{mid}(12, 4, 2) = 4$

При работе с тремя замерами алгоритм позволяет получать достоверное значение при возникновении единичного отказа приводящего к аномальному отклонению одного из значений параметра, как в большую, так и меньшую сторону, или даже при двух отказах, если они приводят к разнонаправленным отклонениям.

Дополнительной возможностью алгоритма является опция корректировки на настраиваемую величину одного из параметров перед сортировкой выборки. Данная процедура позволяет использовать в качестве исходных данных не только одноименные резервируемые параметры, но и дополнительный замер, близкий по функциональному назначению и величине.

$Par = \text{submin}(Par1 - P, Par2, Par3)$

при $P = 3$, $Par1 = 6$, $Par2 = 4$, $Par3 = 2$

$Par = 3$

В качестве конкретного примера использования можно привести контроль давления в камере по результатам измерения давлений перед форсунками окислителя и горючего.

Цензурирование

Основная функция цензоров состоит в защите от ложных решений при независимых отказах датчиков (каналов) измерения параметра в том случае, когда в результате предшествующих отказов датчиков (каналов) схема резервирования измерения данного параметра исчерпана. Кроме того, цензор выполняет функцию защиты от ложных решений при аппаратных отказах, когда имеют место одновременные отказы всех или большинства каналов измерения данного параметра. Цензор сопоставляет значение параметра, отобранное по мажоритарному принципу, из совокупности одновременных его измерений, с предельными значениями. Если значение параметра выходит за границы возможных значений в условиях аварийной ситуации, то цензор отключает алгоритмы, контролируемые данным параметром. Применение цензоров требует корректной оценки порогов из условия предельного поведения параметров в аварийных ситуациях.

При выборе данной схемы цензурирования в качестве альтернативы рассматривалась целесообразность применения критерия близости результатов измерений. Если результаты измерений хотя бы двух каналов близки, то цензор разрешает контроль данного параметра, в противном случае – запрещает контроль. В этом случае количество цензоров параметра возрастает в 3-6 раз (в зависимости от степени резервирования измерений), и, кроме того, для каждого параметра вводится решающее правило, принимающее решение о блокировании алгоритмов контроля данного параметра. Несмотря на усложнение программы, в результате которого вес процедур цензурирования в программе превышает вес основных процедур контроля, такое решение задачи цензурирования не обеспечивает повышения качества защиты от отказов каналов измерений по следующим причинам:

отказы аппаратуры системы измерений будут восприниматься как нормальное функционирование системы измерения и приводить к ложным выключениям двигателя,

для установления критериев расхождения результатов измерений параметра в условиях аварийной ситуации требуются, наряду со сведениями о предельном поведении параметра (как для настройки существующих цензоров), также и данные о стабильности динамических ошибок системы измерений в этих условиях.

Ниже приведена методика определения порогов настройки цензоров при контроле за частоты вращения ротора турбонасосного агрегата и температурой.

Настройка цензоров достоверности измерения частоты вращения ротора турбонасосного агрегата.

Постоянная времени турбонасосного агрегата [1]:

$$\tau_T = [\pi^2 / (75 \times 900)] \times [J \cdot n^2 / (9,8 \times N)],$$

где J - центральный момент инерции ротора турбонасосного агрегата;

N - мощность турбины;

n - частота вращения ротора турбонасосного агрегата.

Формула приводится для размерностей, широко используемых в ракетно-космической отрасли:

$$J = [\text{кг} \times \text{м}^2], N = [\text{л.с.}], n = [\text{об/мин}].$$

Для моделирования процесса нарастания частоты вращения ротора турбонасосного агрегата наиболее подходит апериодическое звено первого порядка.

Переходная характеристика апериодического звена первого порядка:

$$Y(t) = K(1 - e^{-t/\tau});$$

$$K = n, \tau = \tau_T;$$

Настройка цензоров достоверности измерения температур.

Техническое описание на термометры содержат данные о верхней границе постоянной времени. Разработчики термометров дают гарантию, за какой период времени температурное изменение точно будет отслежено. Минимально возможное и номинальное значения данной динамической характеристики датчика не сообщается, а именно эти данные необходимы для назначения цензоров. Экспериментальные данные по динамическим характеристикам термометров ограничены. Как показали результаты огневых испытаний ЖРД, реальные значения постоянной времени сильно отличаются от указанной в документации верхней границы постоянной времени. В силу выше сказанного, постоянную времени датчика определяем аналитически.

Постоянная времени термопары [2]:

$$\tau = 1/\alpha * m/Sa * C,$$

где α - коэффициент теплоотдачи,

m - масса чувствительного элемента термометра,

Sa - площадь поверхности, контактирующая с измеряемой средой,

C - удельная теплоемкость.

$$\tau = [1/\text{Вт/м}^2 * \text{К}] * [\text{кг/м}^2] * [\text{Дж/кг*К}] = [\text{с}]$$

Для наглядности получения значений m , Sa , C их определение покажем на примере конкретной термопары термометра ТХА 449. В термопаре ТХА 449 реализована комбинация термоэлектродов хромель-алюмель (ХА).

Состав сплава хромель: Ni + 9-10%Cr + 0,6-1,2%Co [5]

Состав сплава алюмель: Ni + 1%Si + 2%Al + 1-2,5%Mn [5]

Для упрощения расчетов m принимаем материал термоэлектродов - Ni.

Физические свойства Ni необходимые для расчетов (ρ , C) находим в справочнике.

$$m = \rho * V,$$

где ρ - плотность,

V - объем спая.

При изготовлении термопар ТХА 449 используют провод КТМС диаметром (d) 0,7мм.

$d \approx d_c$ - диаметр спая.

$l_c \approx 1,4 d_c$ - длина спая.

V определяем как сумму объемов половины шара и цилиндра со следующими размерами:

$$d_{ш} = d_{ц} = d_c \quad \text{и} \quad l_{ц} = l_c - d_{ш}/2.$$

$$V = 1/2 * \pi * d_{ш}^3/6 + \pi * d_{ш}^2/4 * l_{ц}$$

Sa определяем как сумму площадей половины шара и боковой поверхности цилиндра.

$$Sa = \pi * d_{ш}^2/2 + \pi * d_{ц} * l_{ц}$$

Коэффициент теплоотдачи определяем по формуле:

$$\alpha = Nu * \lambda/d,$$

где λ - коэффициент теплопроводности;

Nu - число Нуссельта.

Число Нуссельта определяем по формуле [3]:

$$Nu = 2 + 0,03 * Pr^{0,33} * Re^{0,54} + 0,35 * Pr^{0,36} * Re^{0,58},$$

где Pr - критерий Прандтля, $Pr = \mu * C / \lambda$,

Re - число Рейнольдса, $Re = v * D * \rho / \mu$

v - скорость потока измеряемой среды,

D - гидравлический диаметр,

ρ - плотность потока измеряемой среды,

μ - динамическая вязкость среды.

В общем случае $Nu = f(Pr, Re, Gr)$ [4]. Для определения которого используются уже существующий ряд эмпирических формул.

Gr - число Грасгофа, $Gr = gL^3 \beta (t_c - t_0) / v^2$

где g - ускорение свободного падения;

L - определяющий линейный размер поверхности теплообмена;

t_c - температура поверхности теплообмена;

t_0 - температура теплоносителя;

v - коэффициент кинематической вязкости;

β - температурный коэффициент объемного расширения теплоносителя.

Процедура цензурирования является эффективным средством противостояния отказам в аппаратном комплексе, приводящим к некондиционным замерам группы параметров.

Цифровая фильтрация и сглаживание

Для реализации процедуры осреднения параметров на этапе подготовки данных возможно использование алгоритмы вычисления линейной формы.

Алгоритм вычисления линейной формы трех параметров:

$$Par_{l3} = a1 \frac{Par1 - c1}{a2} + b1 \frac{Par2 - c2}{b2} + Par3,$$

где $Par1$, $Par2$, $Par3$ - значения параметров, получаемые из системы измерения или другими алгоритмами подготовки данных,

$a1$, $a2$, $b1$, $b2$, $c1$, $c2$, d - настроечные коэффициенты, задаваемые в формулярных данных для конкретной версии ПМО.

Алгоритм вычисления линейной формы двух параметров:

$$\text{Par}_{12} = a_1 \frac{\text{Par}_1 - c_1}{a_2} + b_1 \frac{\text{Par}_2 - c_2}{b_2} + d,$$

Для отсеивания единичных выбросов в диагностических алгоритмах используется заложенная функция вычисления накопителя кумулятивной суммы (Н) определяемая в зависимости от вида контроля.

При контроле параметра на рост действует условие:

если $\text{Par}(t-n) > \text{Stab}$, то $H = \text{Par}(t) - \text{Par}(t-n)$, в противном случае $H = \text{Par}(t) - \text{Stab}$;

При контроле параметра на падение действует условие:

если $\text{Par}(t-n) > \text{Stab}$, то $H = \text{Stab} - \text{Par}(t)$, в противном случае $H = \text{Par}(t-n) - \text{Par}(t)$.

где t – текущее время,

n – сдвиг в тактах от времени t .

Значение Stab выбирается из условия:

если $n-1 > 1$, то $\text{Stab} = \text{Par}(t-n-1)$, в противном случае $\text{Stab} = \text{Par}(t-n)$.

Мажоритарная схема формирования сигнала аварийности

Мажоритарная схема формирования сигнала аварийности может формироваться при помощи соответствующих настроек решающего правила. Входной информацией для решающего правила обычно являются результаты работы группы диагностических алгоритмов. Использование резервных диагностических признаков при задании образа аварийной ситуации позволяет реализовать эту схему.

Для организации мажоритарной схемы функционирования алгоритм решающее правило настраивается на работу своей определенной ветви. Выбор рабочей ветви решающего правила (основной, ветви единичной дизъюнкции, ветви определения нарушения заданного условия, ветви подсчета установленных разрядов) определяется настройкой логического термина - значениями трех настраиваемых констант-масок: конъюнкция, конъюнкция отрицаний (негативная маска), дизъюнкция. Установка разряда - размещение в нем признака выполнения заложенного в диагностическом алгоритме условия.

Алгоритм решающее правило работает на основной ветви, если в дизъюнктивной маске присутствуют и нулевые и единичные разряды, конъюнктивная и негативная маски не совпадают или нулевые. Отклик алгоритма возникает, если установлен хотя бы один из разрядов, задаваемых дизъюнктивной маской, установлены все разряды, задаваемые конъюнктивной маской, и сброшены все разряды, задаваемые негативной маской. Здесь и далее под установкой разряда подразумевается размещение в нем признака выполнения заложенного в диагностическом алгоритме условия.

Ветвь единичной дизъюнкции работает при единичной дизъюнктивной маске и несовпадающих или нулевых конъюнктивной и негативной масках.

Отклик алгоритма возникает, если установлены все разряды, задаваемые конъюнктивной маской, и сброшены все разряды, задаваемые негативной маской

Ветвь определения нарушения заданного условия работает при нулевой дизъюнктивной маске. Отклик алгоритма возникает, если сброшен хотя бы один из разрядов, задаваемых ненулевой конъюнктивной маской, или установлен хотя бы один из разрядов, задаваемых ненулевой негативной маской

Ветвь подсчета установленных разрядов работает при ненулевой дизъюнктивной маске и совпадающих ненулевых конъюнктивной и негативной масках, Отклик алгоритма возникает, если установлено m разрядов из тех n разрядов, что заданы в дизъюнктивной маске. Число m задается в конъюнктивной и негативной масках.

Как следует из описания мажоритарная схема может быть реализована при работе алгоритма на основной ветви и ветви подсчета установленных разрядов. Последняя, реализуя функцию m из n , имеет гораздо более широкие возможности.

Штрафование диагностических алгоритмов

Данный метод заключается в следующем: каждый диагностический алгоритм содержит в своих настройках параметр (SLong) в зависимости от значения которого он работает в одном из режимов:

- основной режим (SLong = 0): признак выполнения условия формирования отклика устанавливается или сбрасывается на каждом такте работы алгоритма в зависимости от выполнения диагностического критерия;

- режим самоотключения (SLong = 1): отклик устанавливается с первого такта выполнения диагностического критерия и не сбрасывается до конца работы алгоритма;

- режим ограничений на срабатывания (SLong > 0): отклик может устанавливаться в случае выполнения диагностического критерия не более SLong раз, после чего сбрасывается до конца работы алгоритма;

- режим лонгирования отклика (SLong < -1) Отклик устанавливается не более (|SLong| - 1) раз в случае выполнения диагностического критерия, а сбрасывается через заданное значение тактов после выполнения этого критерия.

Режим ограничений на срабатывания позволяет провести штрафование алгоритма исключив его из контроля за состоянием двигателя при по набору заданного числа выходов его на аварийную ветвь, не подтвержденных повторением его срабатывания или срабатыванием других алгоритмов.

Режим лонгирования позволяет задать временной коридор для срабатывания других совместно обрабатываемых алгоритмов и распознавания решающим правилом ситуации, требующей его реакции.

Проверка достоверности измерений специализированными пакетами.

Для обеспечения надежного функционирования системы аварийной защиты и управления применяются превентивные меры обнаружения отказов измерительных средств. Они реализуются путем включения в версию настройки алгоритмов программно-математического обеспечения основной работы системы аварийной защиты и управления специализированных пакетов, осуществляющих предварительное диагностирование системы измерения, не зависимо от контроля за ее настройками и готовностью службами, ответственными за подготовку к огневому испытанию. Данные пакеты реализуют два этапа проверок:

- контроль осуществляемый на заключительном этапе подготовки к огневому испытанию,
- контроль перед началом автоматической циклограммы или в начале автоматической циклограммы огневого испытания, до начала необратимых процессов (отстрел пиропатронов, формирование команды на зажигание и т.п.).

На заключительном этапе подготовки к огневому испытанию осуществляется поканальная проверка измерительных средств. Параметры двигателя и стенда, задействованные в системе аварийной защиты и управления проверяются на предмет нахождения в требуемом диапазоне.

Верхняя граница диапазона:

$$P_{\max i} = P_{vi} + \Delta_{\Sigma}$$

Нижняя граница диапазона:

$$P_{\min i} = P_{ni} - \Delta_{\Sigma}$$

где $i = 1..n$, n - число параметров, контролируемых в пакете,

P_v (P_n) - максимально (минимально) допустимое значение параметра в соответствии с требованиями технического задания к условиям эксплуатации и внешним факторам.

Δ_{Σ} - предел допускаемой погрешности результата измерения.

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_o + \Delta_d + \Delta_{ci}$$

Δ_o - максимально допустимая основная погрешность датчика,

Δ_d - максимально допустимая дополнительная погрешность датчика,

Δ_{ci} - максимально допустимая погрешность системы измерения

При различии положительных и отрицательных погрешностей предел допускаемой погрешности результата измерения определяется отдельно для верхней и нижней границы диапазона.

При выходе за установленные пороги система аварийной защиты и управления программно-математическое обеспечение формирует команду, информирующую о возникновении недостоверного замера и служит сигналом для проведения анализа работы функционального комплекса системы аварийной защиты и управления с целью выявления причин возникновения аномалии (ошибка в

тарировках или коммутации, отказ датчика или аппаратуры системы измерения, сбой программного обеспечения и т.д.).

Совместно с данным контролем осуществляются дополнительные с операции над каналами измерения оборотов и расходов. Планируемые реальные значения параметров оборотов и объемного расхода, поступающие до начала испытаний, как правило равны нулю (определяется применением индуктивных датчиков типа ОГ, ТДР, ТПР и аппаратурой системы измерения) не гарантируют исправность датчиков и каналов измерения. По данной причине при оценке готовности измерительных каналов перед испытаниями проводится дополнительная проверка, осуществляемая путем подачи в систему аварийной защиты и управления тестовых сигналов, генерируемых модулями формирователями сигналов датчиков оборотов.

При этом $F = f(R_d)$,

где F - частота генерируемого модулем сигнала,

R_d - сопротивление датчика.

Выполнения данного условия позволяет провести косвенную оценку состояния самого датчика, правильности настройки системы измерения (учет числа возбудителей, алгоритм пересчета в физические значения).

Контроль в районе старта автоматической циклограммы проводится с целью непосредственно перед началом самого ответственного участка работы системы аварийной защиты и управления проверить систему измерения на предмет появления в ней серьезного отказа. При данном контроле обнаруживаются отказы, проведение испытания с которыми фактически гарантировано приводит или к исключению их из контроля системы аварийной защиты и управления, по причине срабатывания цензоров целой группы параметров, что грозит пропуском аварийной ситуации при испытании или к формированию ложной аварийной команды на выключение двигателя, по причине некондиции данных о параметрах двигателя, используемых для принятия решений о работоспособности двигателя.

На данном этапе при наличии резервирования одноименных параметров диагностические алгоритмы работают с отобранными по мажоритарным признакам параметрами.

Параметры двигателя и стенда, задействованные в системе аварийной защиты и управления, проверяются на предмет нахождения в диапазоне.

Верхняя граница диапазона:

$$P_{\max j} = P_{vj} + \Delta_j$$

Нижняя граница диапазона:

$$P_{\min j} = P_{nj} - \Delta_j$$

где $j = 1..m$, m - число контролируемых в пакете мажоритарно сформированных параметров и параметров, по которым отсутствует резервирование.

P_v (P_n) - максимально (минимально) допустимое значение параметра в соответствии с требованиями технического задания к условиям эксплуатации и формируемым предпусковым условиям.

$$\Delta = (1,5 \dots 2,5) \Delta_{\Sigma}$$

Заключение. Для обеспечения максимальной устойчивой работы системы аварийной защиты и управления ЖРД к отказам средств измерения целесообразно применять весь выше рассмотренный комплекс методов защиты.

Литература

1. Гликман Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.Ф. Гликман. – М.: «Машиностроение», 1974. - 396 с.

2. Измерения в промышленности: Справ. издание в 3-х кн. Способы измерения и аппаратура: Пер. с немецкого [Текст] / под ред. Профоса П. - 2-е издание, переработанное и дополненное. - М.: Metallurgia, 1990.

3. Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче [Текст] / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – Ленинград, Москва: Государственное энергетическое изд-во, 1959. - 418 с.

4. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В.В. Нащокин. – М.: изд-во «Высшая школа». – Изд. 2-е, перераб. и доп., 1975. - 496 с.

5. Рогельберг, И.Л. Сплавы для термопар [Текст]: справочник / И.Л. Рогельберг, В.М. Бейлин. – М.: Metallurgia, 1983, - 360 с.

Воронежский государственный технический университет
АО «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж

METHODS OF MAINTENANCE OF STABILITY SYSTEMS OF EMERGENCY PROTECTION AND CONTROL LRE BY FAILURES OF GAUGES

S.M. Pasmurnov, Candidate of Engineering Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: smpasmurnov@mail.ru

D.Yu. Yakush, Postgraduate, Voronezh State Technical University, Leading Designer, AO KBKhA, Voronezh, Russian Federation, e-mail: duyakush@mail.ru

Stability of work of system of emergency protection and control of the fault measurement one of the most important characteristics that affect its effectiveness. Actions to improve sustainability are extremely versatile. Outside the article is a consideration of the formation of the technical requirements to the measurement channels, select the hardware part of the measurement system, sensors, algorithms of processing of signals from transducers before moving on to the physical dimensions of the parameters, etc. Reviewed list software of the system of emergency protection and control to detect failures of the measuring instruments and General requirements for configuring algorithms that implement this task. The study also identified the main task of the redaction, including protection from spurious solutions at the independent failures of sensors (channels) parameter measurement in the case when as a result of previous failures of sensors (channels) of a redundancy of the measurement of this parameter have been exhausted. In addition, the sensor performs the function of protection against false solutions for hardware failures, when there are simultaneous failures in all or most of the channels of the measurement of this parameter. Maximizing the sustainable operation of the system of emergency protection and control LRE to the failure of the means of measurement requires the use of comprehensive methods of protection

Key words: emergency protection and control, software, diagnostic algorithm, inaccurate measurement, liquid-propellant rocket engines

References

1. Glickman B. F. Automatic regulation of liquid rocket engines. – М: "Engineering", 1974. - 396 p.
2. Measurement in the industry: Right. edition in 3 vol. Measurement techniques and apparatus: Per. from German / Under the editorship of contact Ms. Jolanda profos P. - 2nd edition, revised and enlarged. - М.: Metallurgy, 1990.
3. S. S. Kutateladze Borishansky V. M. Handbook of heat transfer – Leningrad, Moscow: State energy publishing house, 1959. - 418 p
4. V. V. Nashchokin, Technical thermodynamics and heat transfer. –Moscow: publishing house "Higher school" reprint: 2nd, revised and enlarged, 1975. - 496 p
5. Alloys for thermocouples. ANO. ed. Rogelberg I. L., Beilin, V. M. – М.: metallurgy, 1983, - 360 p.

**КОНЦЕПЦИЯ БЕЗАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ**

С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский, О.Ю. Таратынов

В статье изложена концепция безаварийного управления потенциально опасными технологическими процессами. Концепция реализует семь основных этапов: математическое описание процесса; алгоритмизацию процесса безаварийного управления; разработку модели прогнозирования аварийных ситуаций; разработку системы планово-предупредительного обслуживания; формирование интегрального критерия безаварийного управления; разработку методики практической реализации системы безаварийного управления; формирование требований к станции безаварийного управления. В рамках математического описания рассмотрены термодинамический, производственный и нейросетевой подходы. В формате алгоритмизации процесса безаварийного управления поставлена задача разработки глобального алгоритма, отдельные составляющие которого определяют порядок взаимодействия функциональных процедур, исключающий возникновение аварийных ситуаций. Модель прогнозирования аварийных ситуаций представлена композицией трех моделей: производственной, нейросетевой и термодинамической, что дает возможность получать долгосрочный и текущий прогнозы. Разработка системы планово-предупредительного обслуживания основывается на оптимальном календарном планировании работ. В качестве интегрального критерия безаварийного управления представлен функционал, позволяющий на основании резерва времени, определяемого системой прогнозирования и времени приведения системы в нормальное состояние с учетом текущего ресурса, определяемого системой планово-предупредительного обслуживания, определить реальный лимит времени, имеющийся для предотвращения аварийной ситуации. Методика практической реализации строится исходя из доступного на текущий момент аппаратного и программного обеспечения. Станция безаварийного управления представляет собой верхний уровень интегрированной системы безаварийного управления

Ключевые слова: безаварийное управление, прогнозирование, алгоритмизация, математическое моделирование, календарное планирование, интегральный критерий, практическая реализация, станция безаварийного управления

Под безаварийным управлением будем понимать недопущение технологической аварии, вследствие которой возможно возникновение техногенной ситуации. Под аварией понимается нарушение или прекращение технологического процесса. Основная ответственность при этом возлагается на систему управления, которая не должна допустить аварийной ситуации и, в крайнем случае, перевести процесс в безопасное состояние.

Концепция безаварийного управления потенциально опасных технологическими процессами основывается на двух основных ее составляющих: методологической и практической.

В статье рассматриваются методологические основы концепции безаварийного управления.

Методологическая составляющая определяет математический и проектный инструменты, позволяющие реализовать представленные ниже этапы.

Формализация технологического процесса

Наряду с традиционной автоматизированной системой управления технологического процесса (АСУ ТП) в рамках данной концепции внедряется система прогнозирования аварийных ситуаций (СПАС), предусматривающая получение целого

спектра параметров, описывающих реальное динамическое состояние объекта управления. Существует множество различных методов диагностики и систем прогнозирования случайных процессов. Одним из подклассов данных систем являются диагностические экспертные системы, предназначенные для обнаружения источников неисправностей по результатам наблюдений за поведением контролируемой системы [1].

Многообразие существующих методов прогнозирования ставит вопрос о выборе определенного математического аппарата для конкретного технологического процесса. При этом различные методы способны давать как текущий, так и долговременный прогноз. Используя несколько альтернативных методов прогноза, достигается наибольшая достоверность. Таким образом, система безаварийного управления технологическими процессами, используя возможности современных информационных технологий, может быть построена на основе гибридных моделей, комбинирующих, например, термодинамический, производственный и нейросетевой подходы.

Термодинамический подход

В случае термодинамического подхода протекание технологического процесса представляется поведением броуновской частицы в некотором пространстве состояний, и для анализа и составления прогноза дальнейшего развития процесса вводится функция состояния, которая обобщает в себе изменения всех параметров.

Ткалич Сергей Андреевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 243-77-20, e-mail: sergeytkalich@mail.ru
Бурковский Виктор Леонидович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 243-77-20, e-mail: Bvl@vorstu.ru
Таратынов Олег Юрьевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 243-77-20, e-mail: otaratynov@mail.ru

Прогнозирование аварийной ситуации осуществляется по статистическому методу Херста на основании анализа показателя персистентности процесса [2]:

$$E(t) = E(t-1) + \frac{n^{-H}}{\Gamma(H+0,5)} \times \left\{ \sum_{i=1}^n (i)^{H-0,5} \xi_{(1+n(M+t)-i)}^+ + \sum_{i=1}^{n(M-1)} ((n+i)^{H-0,5} - i^{H-0,5}) \times \xi_{(1+n(M-1+t)-i)} \right\} \quad (1)$$

в котором: $E(t)$ – отклонение вектора состояния системы $y(t)$ от среднего значения в момент времени t , причём t принимает здесь целочисленные значения; Γ – гамма-функция; ξ – массив нормально распределённых случайных чисел с нулевым средним значением и единичной дисперсией; n – количество шагов численного интегрирования на интервале времени $\Delta t = [t-1; t]$; M – количество интервалов Δt , анализируемых в модели; H – показатель персистентности размаха, или показатель Херста, характеризующий наличие статистической нестационарности процесса $y(t)$, $H \in [0; 1]$.

Ключевым параметром модели является показатель H , являющийся характеристикой относительного размаха:

$$R(\tau) = \frac{R_0(\tau)}{\sigma(\tau)} = (\alpha \cdot \tau)^H, \quad (2)$$

где $R_0(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} y(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} y(t, \tau)$ – разность максимального и минимального значений (размах) величины $y(t)$ на интервале времени τ ; $\sigma(\tau)$ – среднее квадратическое приращение случайного процесса на интервале τ :

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\Delta E(t)]^2}, \quad (3)$$

где $\Delta E(t)$ – элементарное приращение $y(t)$ на шаге t [3].

В случае $0,5 < H < 1$ наблюдается персистентное (поддерживающееся, или трендоустойчивое) поведение процесса. Если в течение некоторого времени в прошлом наблюдались положительные (отрицательные) приращения процесса, то и впредь следует ожидать их увеличения (уменьшения).

Случай $0 < H < 0,5$ говорит об антиперсистентности процесса. Такой тип системы часто называют – «возврат к среднему», или системой с самовывравниванием. Если система демонстрирует рост в предыдущий период, то скорее всего, в следующем периоде начнется спад. И наоборот, если было снижение, то вероятен близкий подъем. Такой ряд более изменчив, чем ряд случайный, так как состоит из частых реверсов «спад-подъем».

При $H=0,5$ отклонения процесса от среднего являются полностью случайными и не зависят от предыдущих значений.

Таким образом, по степени приближения показателя H к значению $H=1$ можно судить о склонности процесса к выходу за допустимые пределы, то есть о возможности возникновения аварийной ситуации [4].

Продукционный подход

Распознавание образа аварийной ситуации в рамках продукционного подхода осуществляется с помощью аппарата нечеткой логики. Основу системы распознавания аварийных ситуаций на основе нечеткой логики составляет база знаний, строящаяся по данным опроса экспертов. База знаний представляет собой множество нечетких правил $R^{(k)}$, $k=1, \dots, N$, вида

$$R^{(k)} : \text{IF} (x_1 \text{ это } A_1^k \dots \text{AND } x_n \text{ это } A_n^k) \quad (4) \\ \text{THEN} (y_1 \text{ это } B_1^k \dots \text{AND } y_m \text{ это } B_m^k)$$

где N – количество нечетких правил, A_i^k – нечеткие множества

$$A_i^k \subseteq X_i \subset R, i=1, \dots, n,$$

$$B_j^k - \text{нечеткие множества}$$

$$B_j^k \subseteq Y_j \subset R, j=1, \dots, m,$$

x_1, x_2, \dots, x_n – входные переменные продукционной модели,

y_1, y_2, \dots, y_m – выходные переменные продукционной модели.

Символами $X_i, i=1, \dots, n$ и $Y_j, j=1, \dots, m$ обозначаются соответственно пространства входных и выходных переменных [5]. Определяемая на этой модели мера близости к аварийной ситуации является, по существу, функцией принадлежности состояния процесса к аварийному состоянию и изменяется в пределах $L=[0; 1]$.

Нейросетевой подход

При использовании нейронной сети в качестве математической модели распознавания аварийной ситуации обучающая выборка формируется также на основе знаний экспертов при варьировании параметров процесса в границах предельных значений.

Используемая для прогнозирования функция $y(x)$ представима в виде:

$$y_{jk}(x) = f \left(\sum_{i_k} b_{i_k j k} \dots \cdot f \left(\sum_{i_2, j_2} b_{i_2 j_2 2} \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \cdot f \left(\sum_{i_1, j_1} b_{i_1 j_1 1} x_{i_1 j_1 1} + b_{j_1 1}^0 \right) + b_{j_2 2}^0 \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + b_{j_k k}^0 \right), \quad (5)$$

где x, y – векторы входных и выходных переменных сети; b, b^0 – векторы настраиваемых параметров (весовых коэффициентов); $f(b, b^0, x)$ – функция активации нейронов; i – номер входа в нейрон; j – номер нейрона в слое; r – номер слоя сети; x_{ijr} – элемент i вектора x , подаваемый на

нейрон j в слое g . Тогда процесс обучения k -слойной сети можно представить как задачу поиска неизвестных параметров b, b^0 , обеспечивающих такие значения выходным величинам $y_{jk}(x)$, которые бы минимизировали ошибку обучения E :

$$E = \sum_s \sum_j (y_{sj} - y_{sj,эт})^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где s – номер обучающей выборки, для которой устанавливается фактическое отображение $x \xrightarrow{O(x)} y$; $y_{эт}$ – эталонное значение отображения $O(x)$ [6].

На выходе обученной сети получается функция степени близости к аварийной ситуации $N=[0;1]$.

Получение на выходах разных концептуальных моделей однотипной меры близости к аварийной ситуации позволяет осуществить составление композиционной модели, объединяющей в себе достоинства каждой из своих компонент.

Результаты сопоставления концептуальных моделей важны при разработке модели прогнозирования конкретного технологического процесса, являющейся одним из шагов алгоритмизации безаварийного управления.

Алгоритмизация процесса безаварийного управления

Целью данного этапа концепции безаварийного управления является формирование глобального алгоритма, отдельные составляющие которого определяют порядок взаимодействия, исключающий возникновение аварийной ситуации.

Алгоритмизация безаварийного управления предусматривает выполнение следующих шагов:

- а) разработка модели прогнозирования как основы системы прогнозирования аварийных ситуаций (СПАС);
- б) разработка системы планово-предупредительного обслуживания (СППО);
- в) формирование интегрального критерия безаварийного управления (ИКб/аУ);
- г) разработка методики практической реализации системы безаварийного управления;
- д) формулирование требований к станции безаварийного управления.

Каждый из этих шагов формирует один из этапов общей концепции безаварийного управления.

Модель прогнозирования аварийных ситуаций

На рис. 1 представлена композиция трех моделей прогнозирования аварийных ситуаций. Сопоставление продукционной, нейросетевой и термодинамической моделей изложено в работе [7].

В соответствии со схемой рис. 1 прогнозирование аварийных ситуаций включает в себя долгосрочный и текущий прогноз. Долгосрочный прогноз основывается на термодинамической модели, а текущий – на продукционной и нейросетевой моделях, при этом в ситуациях, не предусмотренных обучающими

выборками, предпочтение отдаётся нейросетевой модели.

Выходной величиной для термодинамической модели является показатель персистентности N , который изменяется от 0 до 1; для продукционной модели – мера близости к аварийной ситуации L (может принимать значения от 0 до 1); и для нейросетевой модели – функция степени близости к аварии N (также изменяется от 0 до 1) [8].

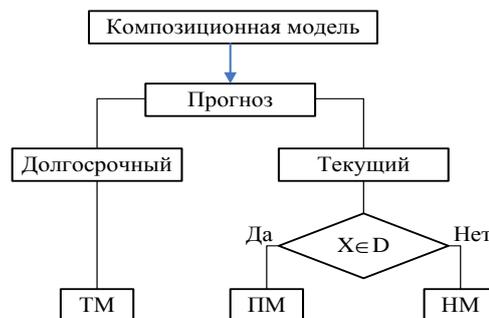


Рис. 1. Блок схема композиционной модели прогнозирования: ТМ – термодинамическая модель, ПМ – продукционная модель, НМ – нейросетевая модель, X – текущие значения параметров, D – обучающая область

Для предотвращения аварии композиционная модель осуществляет непрерывный мониторинг состояния технологического процесса и анализирует критические параметры аварийных ситуаций.

Определить, по какому из параметров процесса происходит его движение к аварийной ситуации, можно с помощью теории чувствительности для функции состояния технологического процесса [9], или методом анализа фрактального движения, который может быть осуществлён полностью формальным путём в реальном масштабе времени методом регрессионного анализа [10].

Важной задачей является также надделение модели прогнозирования не только функцией мониторинга, но и функцией управления. Таким образом, модель прогнозирования аварийных ситуаций необходима для выявления критического параметра и расчета времени запаса $t_{запаса}$, имеющегося в распоряжении системы безаварийного управления (б/аУ) на приведение критического параметра к его номинальным пределам.

Система планово-предупредительного обслуживания

На данном этапе необходимо разработать систему планово-предупредительного обслуживания СППО, используя оптимальное календарное планирование работ ОКПР.

Разработка и реализация алгоритма оптимального календарного планирования работ по упреждению аварийных ситуаций в совокупности с системой прогнозирования образуют единый комплекс безаварийного управления производством.

В числе входных величин алгоритма должны присутствовать параметры планового обслуживания оборудования, показатели непосредственного мониторинга системы объектов обслуживания, экспертные оценки влияния нештатного функционирования элемента на нормальное функционирование всей системы, сложность и длительность ремонта конкретных единиц оборудования.

К таким параметрам относятся:

- запас времени до предполагаемого отказа объекта, рассчитанный по времени средней наработки на отказ;

- степень близости объекта к аварии, определяемую с помощью системы прогнозирования;

- степень влияния аварии на отдельном объекте на функционирование всей системы, определяемую экспертным путём и уточняемую в ходе тестирования разрабатываемого алгоритма для каждой конкретной обслуживаемой системы;

- сложность проведения ремонтных работ, характеризуемую средним временем ремонта объекта, нормативным количеством обслуживаемых единиц и нормативным количеством ресурсов обслуживания.

Математическая постановка задачи сводится к поиску экстремума функции цели: степени аварийности обслуживаемой системы. Аналитическое решение производится, например, методом неопределённых множителей Лагранжа.

Общая схема алгоритма ОКПР по упреждению аварийной ситуации представлена на рис. 2.



Рис. 2. Общая схема алгоритма ОКПР по упреждению аварийной ситуации

Представленный алгоритм реагирует на случайные события, возникающие в производственной системе увеличением запаса ресурсов, направляемых на соответствующий агрегат. В случае возникновения спорных ситуаций, алгоритм ОКПР отдаёт большую часть ресурсов тому оборудованию, которое наиболее важно для всего системного процесса [11].

Для формирования интегрального критерия безаварийного управления данный алгоритм позволяет определить текущий ресурс объекта $t_{\text{ресурса}}$ и время ремонтно-восстановительных работ $t_{\text{р-в}}$.

Формирование интегрального критерия безаварийного управления

Реакцией системы безаварийного управления на возникновение критического состояния является предельно быстрое воздействие на критический параметр, выявленный средствами диагностики и прогнозирования, с целью приведения его к номинальным пределам, при условии достаточности имеющегося для этого запаса времени $t_{\text{запаса}}$ и времени этого приведения $t_{\text{прив}}$, необходимого соответствующему каналу управления (регулирования).

Интегральным критерием безаварийного управления (ИКб/аУ) выступает функционал:

$$S = F(x(t), t_{\text{запаса}}, T_{\text{прив}}), \quad (7)$$

где $T_{\text{прив}}$ – матрица интервалов времени, необходимых системе управления для предотвращения аварийной ситуации.

Для проверки условия приводимости процесса в нормальное состояние $t_{\text{запаса}} \geq t_{\text{прив}}$ следует использовать тот элемент t_{ij} матрицы $T_{\text{прив}}$, для которого избыток времени $t_{\text{изб}}$, имеющегося для предотвращения аварийной ситуации, наименьший:

$$t_{\text{изб}} = \min_{\substack{j=1,3 \\ i=1,n}} (t_{\text{запаса}} - t_{\text{прив},ji}), \quad (8)$$

где i – количество регулируемых параметров, $j = 1, 2, 3$ – определяет одну из следующих ситуаций в зависимости от прогноза на аварию A :

$$S = \begin{cases} S_1, & A = 0; \\ S_2, & A = 1, t_{\text{запаса}} \geq t_{\text{прив}}; \\ S_3, & A = 1, t_{\text{запаса}} < t_{\text{прив}} \end{cases} \quad (9)$$

где S_1 – нормальная ситуация, S_2 – предаварийная ситуация, S_3 – авария.

С учетом системы планово-предупредительного обслуживания, поскольку по мере уменьшения текущего ресурса $t_{\text{ресурса}}$, его значение приближается к значению времени $t_{\text{р-в}}$, необходимому для проведения требуемых ремонтно-восстановительных работ, избыток времени определится выражением:

$$t_{\text{изб}} = \min_{i=1,n} (t_{\text{ресурса},i} - t_{\text{р-в},i}), \quad (10)$$

позволяющим использовать систему прогнозирования аварийных ситуаций СПАС

совместно с традиционной системой планово-предупредительного обслуживания СППО, и по сути дела реализовать идею [12]:

$$ИКб/аУ = СПАС + СППО. \quad (11)$$

Методика практической реализации системы безаварийного управления

Методика практической реализации строится исходя из доступного на текущий момент технического (аппаратного и программного) обеспечения.

Основные принципы методики базируются на рациональном структурировании системы.

Ниже на рис. 3 представлена обобщенная структура автоматизированной системы безаварийного управления технологическим процессом (АС б/аУ ТП), состоящая из взаимосвязанных подсистем, которые классифицируются по исполняемым функциям:

- сбора и первичной обработки значений технологических параметров и состояния исполнительных механизмов насосов, запорной и регулирующей арматуры (ЗРА);

- двусторонней передачи данных, в том числе, между контроллерами резервированных систем и систем безопасного управления;

- графического отображения состояния технологического оборудования, исполнительных механизмов насосов, запорной и регулирующей арматуры;

- регистрации и архивации значений технологических параметров;

- интерактивного ввода параметров, необходимых для выполнения оперативных расчетов;

- автоматического регулирования и дистанционного управления исполнительными механизмами насосов, вентиляторов, запорной и регулирующей арматуры;

- сервисного обслуживания с учетом оптимального календарного планирования работ.

Входными данными автоматизированной системы безаварийного управления являются также параметры планового обслуживания оборудования, показатели непосредственного мониторинга системы объектов обслуживания, экспертные оценки влияния неправильного функционирования элемента на нормальное функционирование всей системы, сложность и длительность ремонта конкретных единиц оборудования [13,14].



Рис. 3. Обобщенная структура АС б/аУ ТП

На пункте управления в оперативном контуре располагается автоматизированное рабочее место оператора-технолога АРМ ОТ, с которого осуществляется контроль и управление оборудованием.

Автоматизированное рабочее место оператора-технолога должно иметь системную связь со станцией безаварийного управления, АРМ

оперативного персонала и АРМ инженера автоматизированной системы управления.

В неоперативном контуре управления должно быть размещено АРМ инженера АСУ для обслуживания программно-технического комплекса (ПТК): конфигурирования аппаратуры и коммуникаций, диагностики и отладки программного обеспечения.

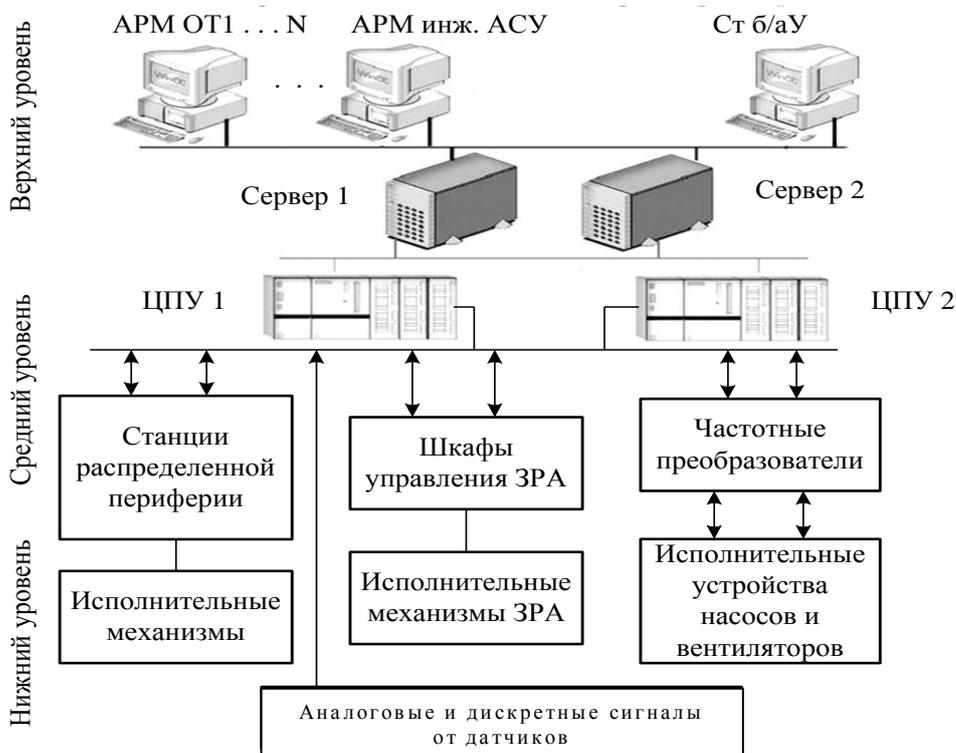


Рис. 4. Структурная схема аппаратного обеспечения АС б/аУ ТП

На рис. 4 рассмотрена структурная схема аппаратного обеспечения АС б/аУ ТП.

Автоматизированная система управления технологическим процессом имеет иерархическую трехуровневую структуру. При этом верхний и средний уровень ПТК построены на базе локальной вычислительной сети, а нижний уровень обеспечивает ее связь с технологическим оборудованием.

Нижний уровень системы включает датчики с нормированным выходом, датчики непосредственного контроля и прямого действия, контактные концевые выключатели арматуры (или бесконтактные преобразователи информации о конечных положениях арматуры), контактные реле, органы местного управления, в том числе аварийные кнопки.

Нижний уровень системы должен быть построен таким образом, чтобы была обеспечена возможность ремонта, опробования механизмов без связи с верхними уровнями АСУ и аварийного оперативного отключения механизма в случае отказа среднего и верхнего уровней системы.

Средний уровень системы в структуре АС б/аУ ТП базируется на программируемых

логических контроллерах в составе локальной вычислительной сети и обеспечивает:

- прием дискретных и аналого-цифровое преобразование сигналов, поступающих с нижнего уровня;
- формирование пакетов этой информации и передачу их по локальной сети на верхний уровень;
- исполнение программ контроля и управления, в том числе автоматического регулирования, блокировок и аварийного включения резерва;
- прием с верхнего уровня сети и преобразование цифровых сигналов в аналоговые и релейные в соответствии с заданными алгоритмами;
- передачу команд на объект управления.

Размещение центральных процессорных устройств (ЦПУ) и модулей ввода/вывода в шкафах контроллеров может предполагать использование станций децентрализованной (распределенной) периферии. В таком случае шкафы управления арматурой и частотные преобразователи могут располагаться в непосредственной близости к исполнительным механизмам и устройствам.

Верхний уровень системы представляет собой человеко-машинный интерфейс и предназначен для визуализации технологического процесса в виде мнемокадров и для управления технологическим оборудованием на основе SCADA-системы. Резервирование на данной схеме представлено дублированием.

Важным элементом верхнего уровня является станция безаварийного управления Ст б/аУ, требования к которой сформулированы ниже.

Формирование требований к станции безаварийного управления

Станция безаварийного управления представляет верхний уровень системы безаварийного управления. В виде программного продукта в ней отражены этапы всей концепции безаварийного управления.

Таким образом, на Ст б/аУ, интегрированную в АСУ ТП, возлагаются задачи :

- прогнозирования;
- анализа критических параметров;
- расчета ресурсных составляющих;
- формирования приоритетных регуляторов, изменяющих тактику управления по данным прогноза;
- и в итоге исполнения функции интегрального критерия безаварийного управления ИКб/аУ.

Литература

1. Ткалич, С.А. Диагностические экспертные системы безаварийного управления технологическими процессами [Текст] / С.А. Ткалич // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2007. - Т. 3. - № 5. - С. 38-43.

2. Ткалич, С.А. Исследование системы прогнозирования аварийных ситуаций на базе термодинамической модели [Текст] / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. 2008. Т. 33. № 3.3. С. 399-403.

3. Mandelbrot, B.B. Fractional Brownian motions, fractional noises and application / B.B.Mandelbrot, J.W.Van Ness //SIAM Rev., 1968, №10, p.422-437.

4. Ткалич, С.А. Идентификация состояния стохастических систем [Текст] / С.А. Ткалич, Е.М. Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2008. - №1. - С. 44-46.

5. Ткалич, С.А. Лингвистическая система прогнозирования аварийных ситуаций в производстве синтетических каучуков [Текст] / С.А. Ткалич // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2009. - Т. 5. - № 8. - С. 103-112.

6. Ткалич, С.А. Нейросетевая модель процесса прогнозирования аварийной ситуации [Текст] / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. - 2008. - Т. 33. - №3.1. - С. 196-200.

7. Ткалич, С.А. Реализация композиционной модели прогнозирования аварийных ситуаций в промышленных системах безаварийного управления [Текст] / С.А. Ткалич, В.Л. Бурковский // Системы управления и информационные технологии. - 2010. - Т. 40. - № 2. - С. 91-94.

8. Ткалич, С.А. Модели принятия решений в системах управления потенциально-опасными производствами [Текст] / С.А. Ткалич, В.П. Поваров, А.В. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2014. - Т. 10. - № 5-1. - С. 129-132.

9. Ткалич, С.А. Определение доминирующих параметров риска в системах прогнозирования аварийных ситуаций [Текст] / С.А. Ткалич // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - Т. 6. - № 1. - С. 81-84.

10. Ткалич, С.А. Анализ критических параметров аварийных ситуаций технологических процессов [Текст] / С.А. Ткалич // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2011. - № 2. - С. 69-71.

11. Ткалич, С.А. Алгоритмизация оптимального календарного планирования в системе безаварийного управления производством [Текст] / С.А. Ткалич // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2011. - № 1. - С. 60-65.

12. Ткалич, С.А. Интегральный критерий безаварийного управления технологическими процессами [Текст] / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии.- 2009. - Т. 38. - № 4.1. - С. 188-191.

13. Ткалич, С.А. Система автоматизации технологического процесса обжига окатышей [Текст] / С.А. Ткалич // Системы управления и информационные технологии. - 2006. Т. 23. - № 1. -С. 56-59.

14. Бурковский, В.Л. Структура системы автоматизированного управления технологическим процессом химводоочистки для АЭС [Текст] / В.Л. Бурковский, С.А. Ткалич, Д.В. Котов // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2011. - № 3. - С. 56-59.

Воронежский государственный технический университет

THE CONCEPT OF ACCIDENT-FREE CONTROL ON THE BASIS OF FORECASTING MODELS OF STATUSES POTENTIALLY DANGEROUS TECHNOLOGICAL PROCESSES

S.A. Tkalich, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sergeytkalich@mail.ru

V.L. Burkovsky, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: Bvl@vorstu.ru

O. Ju. Taratynov, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: otaratynov@mail.ru

In article the concept of accident-free control by potentially dangerous technological processes is explained. The concept realizes seven main stages: mathematical process description; algorithmization of process of accident-free control; development of a forecasting model of alert conditions; development of the system of routine preventive maintenance; formation of integral criterion of accident-free control; development of a technique of practical implementation of system of accident-free control;

formation of requirements to the station of accident-free control. Within the mathematical description thermodynamic, productional and neural network approaches are considered. In a format of algorithmization of process of accident-free control the task of development of a global algorithm which separate components define the order of interaction of the functional procedures excluding origin of alert conditions is set. The forecasting model of alert conditions is provided by composition of three models: productional, neural network and thermodynamic that gives the chance to receive long-term and current forecasts. Development of the system of scheduled preventive service is based on optimum scheduling of operations. As integral criterion of accident-free control the functionality allowing to define a real limit of time based on the float time determined by system of prediction and time of coercion of system in the normal state taking into account the current resource determined by system of scheduled preventive service, which is available for preventing of an alert condition is provided. The technique of practical implementation is built proceeding from available hardware and the software at the moment. The station of accident-free control represents the top level of the integrated system of accident-free control

Key words: accident-free management, prediction, algorithmization, mathematical model operation, scheduling, integral criterion, practical realization, station of accident-free management

References

1. Tkalich S.A. Diagnosticheskie jekspertnye sistemy bezavarijnogo upravljenja tehnologicheskimi processami [Diagnostic expert systems of accident-free management technological processes] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2007. T. 3. № 5. S. 38-43.
2. Tkalich S.A. Issledovanie sistemy prognozirovanija avarijnyh situacij na baze termodinamičeskoj modeli [Research of system of prediction of contingency situations on the basis of thermodynamic model] // Sistemy upravljenja i informacionnye tehnologii. 2008. T. 33. № 3.3. S. 399-403.
3. Mandelbrot B.B. Fractional Brownian motions, fractional noises and application / B.B.Mandelbrot, J.W.Van Ness //SIAM Rev., 1968, №10, p.422-437.
4. Tkalich S.A., Vasil'ev E.M. Identifikacija sostojanija stohastičeskich sistem [Identification of a condition of stochastic systems] // Jeletrotehničeskie komplekxy i sistemy upravljenja. 2008. №1. S. 44-46.
5. Tkalich S.A. Lingvističeskaja sistema prognozirovanija avarijnyh situacij v proizvodstve sintetičeskich kačukov [Linguistic system of prediction of contingency situations in production of synthetic rubbers] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2009. T. 5. № 8. S. 103-112.
6. Tkalich S.A. Nejrosetevaja model' processa prognozirovanija avarijnoj situacii [Neural network model of process of prediction of a contingency situation] // Sistemy upravljenja i informacionnye tehnologii. 2008. T. 33. №3.1. S. 196-200.
7. Tkalich S.A., Burkovskij V.L. Realizacija kompozicionnoj modeli prognozirovanija avarijnyh situacij v promyšlennyh sistemah bezavarijnogo upravljenja [Realization of composition model of prediction of contingency situations in the production systems of accident-free management] // Sistemy upravljenja i informacionnye tehnologii. 2010. T. 40. № 2. S. 91-94.
8. Tkalich S.A., Povarov V.P., Burkovskij A.V. Modeli prinjatija reshenij v sistemah upravljenja potencial'no-opasnymi proizvodstvami [Decision making models in control systems of potential-dangerous productions] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2014. T. 10. № 5-1. S. 129-132.
9. Tkalich S.A. Opredelenie dominirujuščih parametrov riska v sistemah prognozirovanija avarijnyh situacij [Determination of the dominating risk parameters in systems of prediction of contingency situations] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2010. T. 6. № 1. S. 81-84.
10. Tkalich S.A. Analiz kritičeskich parametrov avarijnyh situacij tehnologičeskich processov [Analysis of bottlenecks of contingency situations of technological processes] // Jeletrotehničeskie komplekxy i sistemy upravljenja. 2011. № 2. S. 69-71.
11. Tkalich S.A. Algoritmizacija optimal'nogo kalendarnogo planirovanija v sisteme bezavarijnogo upravljenja proizvodstvom [Algorithmization of optimum scheduling in system of accident-free production management] // Jeletrotehničeskie komplekxy i sistemy upravljenja. 2011. № 1. S. 60-65.
12. Tkalich S.A. Integral'nyj kriterij bezavarijnogo upravljenja tehnologičeskimi processami [Integral criterion of accident-free management of technological processes] // Sistemy upravljenja i informacionnye tehnologii. 2009. T. 38. № 4.1. S. 188-191.
13. Tkalich S.A. Sistema avtomatizacii tehnologičeskogo processa obzhiga okatyshej [System of automation of technological process of roasting of pellets] // Sistemy upravljenja i informacionnye tehnologii. 2006. T. 23. № 1. S. 56-59.
14. Burkovskij V.L., Tkalich S.A., Kotov D.V. Struktura sistemy avtomatizirovannogo upravljenja tehnologičeskimi processami himvodoočistki dlja AJeS [Structure of system of automated management of technological process of chemical water purification for the NPP] // Jeletrotehničeskie komplekxy i sistemy upravljenja. 2011. № 3. S. 56-59.

АНАЛИЗ ПЛОТНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ МЕХАНОТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В НЕГЕРМЕТИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.И. Борисова, В.Л. Бурковский

Рассматриваются специфические особенности теплообмена в негерметизированных электротехнических комплексах механотронного исполнения с цифровым управлением под агрессию глубокого вакуума и невесомости при широтно-импульсной модуляции на несущей частоте в контуре «контроллерный электронный преобразователь-исполнительный электромеханизм». Показана пренебрежительная малость конвективной составляющей теплопроводности с преимуществом «кондуктивно-радиационного» охлаждения интегрированных механотронных конструкций. Обоснованы оптимизированные соотношения внутренних тепловых потоков по контурам развернутой поверхности с учетом факторов сверхдолговечности и ускоренных ресурсных испытаний при рациональности форм общей архитектуры интеллектуального агрегата и принципов протоколно-кодowego информобмена, функциональной и технологической завершенностей, планируемой программно-алгоритмической системы модулей в рамках концепции альтернативной инвариантности. Обосновывается, что анализ и синтез плотности тепловых режимов в формате теплового проектирования является обязательной этапной составляющей разработки механотронной аппаратуры спецтехники

Ключевые слова: электротехнические комплексы, цифровая механотроника, вакуумный теплообмен, сверхдолговечность, программно-алгоритмические системы

Экономика перспективного космоса предусматривает системно активный рост долговечности базовых электротехнических комплексов: исполнительных механизмов его рабочих аппаратов (КА) негерметичного исполнения (КАН) с функциональной наращиваемостью и критической стойкостью при разумной конструктивной интеграции электро-механотронных движителей (ЭМТД) в условиях глубокого физического вакуума, невесомости, солнечных излучений, гравитации и магнитных полей земли с учетом зависимостей [1]. Актуальность исследований, характеризующих научно-техническую направленность, производственно-технологические аспекты создания такой аппаратуры нового поколения, в факторах совместимости противоположностей «вакуум-ресурс- цифровая функция» при условиях переменных внешних и внутренних тепловых потоков выделяет задачу теплорационального обмена и защиты совмещенных ЭМТД-конструкций наиболее эффективным методом математического моделирования при описании процесса теплопередачи по структурным контурам проблемного поля функциональной напряженности высокоресурсных вакуумных микроконтроллерных бесконтактных приводов постоянного тока (МК-БЭПТ-ВВ) мощностью до 100 Вт [2]. Однако эффективное матмоделирование тепловых соотношений часто связанное с неопределенностью физических процессов требует и совокупности тепловых экспериментов на имитационных моделях. При этом в процессе теплообмена ЭМТД актуальны все виды теплозащит – кондуктивный, конвективный и излучением, которые обеспечивают отвод тепла до 30% потребляемой мощности МК-БЭПТ-ВВ (при КПД ≤ 70%). В тоже время электромеханический¹ узел ЭМТД, являясь основ-

ным ядром механической активности систем КАН, локально через несущий корпус, интегрируется с периодом, с базовым уровнем кондуктивного теплообмена МК-БЭПТ-ВВ через температуры корпусу КА в точке установки [3]. При этом, тепловой поток «теплопроводности» описывается уравнением:

$$q_{ТП} = \frac{Q_{ТП}}{S_{ТП}} = \frac{\lambda_{ТП}}{b} (Q_1 - Q_2), \quad (1)$$

где: $Q_{ТП}$ и $S_{ТП}$ – количество тепла и теплопроводящая поверхность, переносимые тепловой поток (ТП); $\lambda_{ТП}$ и b – коэффициент теплопроводности и толщина стенки материала характеризующие его свойства; Q_1 и Q_2 – температура по обемим сторонам стенок.

«Конвекция» характеризуется соотношением:

$$q_k = \frac{Q_k}{S_k} = \alpha_k (Q_3 - Q_4), \quad (2)$$

где: α_k – коэффициент теплообмена при температуре по обемим сторонам.

Естественная же конвекция с высотным разрежением (и невесомостью) снижают свою эффективность, поэтому для высокого вакуума (выше 100 км), конвективным теплообменом в технических расчетах обычно пренебрегают, считая его малым. Теплопередачу излучением E_n в высоком вакууме представляют классическим законом Стефана-Больцмана (или Кирхгофа, Ламберта) через коэффициенты accommodations поверхности переноса d_1 и d_2 , а также теплопроводности λ [4, 5]:

$$E_n = 5,7 \cdot E_e \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot E_r, \quad (3)$$

$$E_e = \frac{1}{\frac{1}{e_2} + \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \cdot \left[\left(\frac{1}{e_1} \right) - 1 \right]}, \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – температуры на внешней и внутренней поверхности переноса; E_r – геометрический фактор; E_e – приведенная степень черноты; A_1, A_2, e_1, e_2 – площади и коэффициенты излучения внешней и внутренней поверхностей.

Борисова Алина Игоревна – ВГТУ, аспирант, тел. 8-951-549-64-07.

Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru.

Финишное выражение коэффициента теплопроводности λ_B в высоком вакууме:

$$\lambda_B = \frac{\alpha}{2-\alpha} \lambda_B^* = \frac{\alpha(\gamma+1)\nu_{ap}d}{8T} p = \frac{\alpha}{2-\alpha} K_T p. \quad (5)$$

В среднем вакууме конвективный теплообмен определится соотношением:

$$\lambda = \frac{\lambda_H^* d}{d+g_1+g_2} = \frac{(9\gamma-5)\eta c_v d}{4(d+g_1+g_2)}, \quad (6)$$

$$\text{где: } g_1 = \frac{(2-\alpha_1)(9\gamma-5)}{2\alpha_1(\gamma+1)} L; \quad (7)$$

$$g_2 = \frac{(2-\alpha_2)(9\gamma-5)}{2\alpha_2(\gamma+1)} L. \quad (8)$$

Для приближенных расчетов: $g_1 = g_2 = L$;
 $L = L \cdot \frac{1}{p}$, $\lambda = A_p(B+p)$,

$$A = (9\gamma-5)\eta \frac{\gamma}{4}, \text{ тогда} \\ B = \frac{(9\gamma-5)[(2-\alpha_1)\alpha_2 + (2-\alpha_2)\alpha_1]L_1}{2(\gamma+1)da_1a_2}. \quad (9)$$

Оценка величины энергопоступлений от ЭМТД формализуется соотношением:

$$Q_{\text{пос}} = K \sum_{i=1}^n N_i (1-h_i), \quad (10)$$

где: K – коэффициент электромагнитного единства;
 N – магнитная составляющая.

Для i -го нелокализованного источника тепла дифуравнение среднеинтегральной температуры принимает вид:

$$[c \cdot m]_{\text{ЭМТ}} \frac{\partial T_{\text{ЭМТ}}}{\partial t} = Q_{\text{ЭМТ}} + [\alpha \cdot F]_{\text{ЭМТ}} [T_{\text{ЭМТ}} - T_K], \quad (11)$$

где: c и m – удельные теплоемкость и масса составляющих ЭМТД; α и F – коэффициент теплопередачи от составляющих ЭМТД; K ; T_K и $T_{\text{ЭМТ}}$ – температура на корпусе КА и ЭМТД.

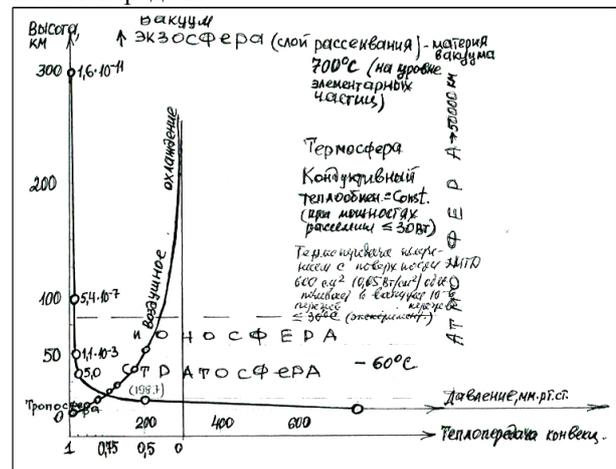
Последнее произведение в соотношении определяет суммарное количество тепла, передаваемое излучением сверх температуры корпуса.

В инженерной практике улучшение условий отвода тепла при высоком эксплуатационном вакууме достигается увеличением площади и качества отработки излучающей радиационной поверхности (с покрытиями), повышением теплопроводности конструкционных материалов и созданием дополнительных теплоотводов, имея в виду, что уже при давлении ниже 10^{-8} кгс/см², конвективная составляющая теплопроводности окружающей среды становится пренебрежительно малой с преимуществом «радиационно-излучающего» охлаждения. При анализе такого ЭМТД распределение тепловой мощности задается осредненным по поверхности, но с последующим учетом локальностей тепловыделения его составляющих (электромеханика, электроника, в т.ч. микроконтроллерная, силовая, интерфейсная) в местах крепления.

В ходе реализации рассмотренных выше математических моделей производится графический вы-

вод во времени величин внутренних тепловых потоков с разверткой всей поверхности ЭМТД и цветовым отображением при формировании расчетных методик и оптимизации тепловых режимов по факторам совмещений срока службы и устойчивости к «высокому» вакууму при учете по критериям подходов диагностики и ускоренных ресурсных испытаний для подтверждений качества сверхдолговечных МК-БЭПТ-ВВ. Максимум реализации такого единства предполагает и обязательную рациональность форм общей архитектуры интеллектуального агрегата при диктуемом объектом «конструктивно-электромагнитной» совместимости, предусматривающей экономичные принципы протокольного информобмена, функциональной и технологической завершенностей базовых механотронных компонентов, интерфейсов и системосхемотехнических решений при внутренней герметичности электронной составляющей. Обладая большим сроком службы и стойкостью в агрессивных условиях, электромагнитной совместимостью, возможностями эффективного управления являются наилучшим решением для космического применения (механизмы раскрытия трансформируемых агрегатов и панелей солнечных батарей, остронаправленных антенн, гироскопических устройств, научной аппаратуры, стыковочного испытательного оборудования). Поэтому задачи анализа и синтеза такого класса систем актуальны, особенно в области разработки базовых моделей теплового взаимодействия составляющих их объектов.

Рабочие характеристики давления, температуры и теплопередачи



Литература

1. Мещеряков, И.В.. В мире космонавтики [Текст] / И.В. Мещеряков. - Н. Новгород. - 1996.
2. Цаплин, С.В. Основы теплообмена КА [Текст]: учеб. пособие / С.В. Цаплин, С.А. Боличеев, А.Е. Романов. – М., 2013.
3. Голиковская, К.Ф. Математическое моделирование тепловых потоков космических аппаратов [Текст] / К.Ф. Голиковская // Вестник Сибирского Государственного аэрокосмического университета им. Решетнева. – 2005.- Вып. №3.

4. Белокрылов, И.В. Основы вакуумной техники, теплоты в вакууме [Текст] / И.В. Белокрылов. – М.: Вактрон, 2015.

5. Васильев, Е.Н. Математическое моделирование и оптимизация теплообмена в космических аппаратах [Текст] / Е.Н. Васильев // ИВТ СО РАН. - 2009.- Вып. №6.- Т. 14.

Воронежский государственный технический университет

ANALYSIS OF SOLIDITY OF TEMPERATURE REGIMES OF MECHANOTRONIC EQUIPMENT IN AN UNSEALED ELECTRICAL COMPLEXES

A.I. Borisova, postgraduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail:alinka_borisova93@mail.ru.

V.L. Buurkovskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: bvl@vorstu.ru.

The specific features of heat transfer in unsealed electrotechnical complexes of mechanotronic performance with digital control, under aggression of deep vacuum and weightlessness, with the pulse modulation circuit "controller electronic unit - electric mechanism" at the carrier frequency is considered. Also the disparaging smallness of the convective component of the thermal conductivity with the advantage of "conductive-radiation" of cooling integrated mehanotronic design is shown. There is a justification of the optimized ratio of the internal heat flows along the contours of the flattened surface taking into account the factors of long-lasting and accelerated tests for rationality forms of the overall architecture of the intelligent unit and principles of protocol code informally, functional and technological completeness that is planned by program-algorithmic system of modules in part of the alternative concept of invariance. Substantiates that the analysis and synthesis of the density of thermal design is a mandatory component of the development mechanotronic equipment

Key words: electrical systems, digital mechanotronic, long-lasting, vacuum heat transfer, software algorithmic systems

References

1. Meshcheryakov I. V. V mire kosmonavtiki [In the world of space travel]. N. Novgorod. – 1996.
2. Tsaplin S.V., Bolichev S.A., Romanov A.E. Osnovi teploobmena KA [Fundamentals of spacecraft heat-exchange]. Samara State University. Textbook. – 2013.
3. Golikovskiy K.F. Matematicheskoe modelirovanie teplovih potokov kosmicheskikh apparatov [Mathematical modelling of heat flows in spacecrafts]. Bulletin of the Siberian State air and space University named after Reshetnev. - 2015.
4. Belokrylov I.V. Osnovi vakuumnoi tehniki, toploti v vakuume [Basics of vacuum technology, the heat in a vacuum]. Vaktron. A series of Lectures. - 2015.
5. Vasiliev E.N. Matematicheskoe modelirovanie i optimizaciy teploobmena [Mathematical modeling and optimization of heat transfer in non-sealed space-ship performance]. ICT SB RAS. – 2009.

УПРАВЛЕНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В.Ж. Бочаров, В.Л. Бурковский

Современный робототехнический комплекс — сложная система подверженная влиянию большого количества факторов. Экстремальные условия внешней среды могут оказать серьезное негативное влияние на систему управления робототехнического комплекса или вывести ее из строя. Под экстремальными условиями подразумеваются два типа факторов: природные (температура, давление, разреженность воздуха т.д.) и антропогенные (ионизирующая радиация, магнитные и электрические поля, различные перегрузки). Для преодоления подобных негативных факторов система управления должна обладать высокой адаптивностью. Наиболее очевидный вывод - система управления на основе прогнозирующей модели недостаточно эффективна для поставленной задачи. Еще один подход — система управления РТК на основе нечетких нейронных сетей.

На примере системы управления РТК УПТО «РОИН-200» разработана математическая модель, по которой разработана нечеткая нейронная сеть, скрытый слой которой состоит из нескольких вложенных нейронных сетей, выполняющих функции управления различных блоков РТК (пульт управления, стрела РТК и блок управления ауригерами). Разработанная на основе этих идей нейронная сеть, внедренная в систему управления РТК РОИН-200, позволила достичь прироста производительности и серьезно оптимизировать систему управления.

На основе вышесказанного можно заключить, что нечеткие нейронные сети позволяют существенно повысить эффективность функционирования систем управления РТК

Ключевые слова: управление, робототехника, экстремальные условия, нечеткая логика, нейронные сети, оптимизация

Робототехнический комплекс в современных условиях — это сложная система, на которую влияет огромное количество различных по своей природе факторов. Существует множество различных вариантов классификации РТК по различным признакам и

особенностям, но в рамках статьи мы рассмотрим их деление по типам системы управления. Также рассмотрим основные задачи, решаемые системами управления.



Рис. 1. Типы систем управления



Рис. 2. Задачи системы управления

Очевидно, что чем тяжелее условия, в которых функционирует система управления РТК, тем большие к ней предъявляются требования в плане отказоустойчивости системы. Если взглянуть на проблему внешних

экстремальных условий в целом, то все эти факторы можно разделить на две основные подгруппы: природные и антропогенные (экстремальные температуры, давления; разреженность воздуха; магнитные и электрические поля; ионизирующая радиация; ускорения; невесомость и различные перегрузки). Для нивелирования всех этих негативных факторов система управления РТК

Бочаров Владимир Жанович – ЗАО МГК «Интехрос», инженер-радиоэлектроник, e-mail: dr.bocharoff@yandex.ru
 Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

должна обладать высоким уровнем адаптивности.

Один из вариантов решения проблемы влияния экстремальных условий внешней среды — использование прогнозирующих моделей — это один из самых актуальных методов ТАУ. В основном данный метод применяется в химической промышленности. Объект управления представляется как линейная модель. Главные особенности данного метода — рассмотрение ограничений, накладываемых на вектор состояний, а также качество процесса управления в реальном времени. Также необходимо оценивание или измерение объекта управления в реальном времени. Данные ограничения значительно снижают возможность использования подобного подхода при разработке универсальной системы управления для настоящего сложного объекта управления.

Альтернативой этого подхода выступает аппарат нечеткой логики и нейронных сетей.

Следующим шагом к созданию универсальной системы управления, способной адаптироваться к экстремальным внешним условиям, является использование нечетких нейронных сетей.

Нечеткие нейронные сети, используя аппарат нечеткой логики, позволяют получать достаточно точные результаты. Для подбора параметров и обучения нейронных сетей используется метод обратного распространения ошибки, созданный изначально для персептрона. По сути система управления представляется как нечеткая многослойная сеть, обычно имеющая четыре слоя: слой фаззификации входных данных, слой активации, слой нечетких правил и слоя вывода данных. Сейчас наиболее распространены нечеткие нейронные сети типа ANFIS и TSK — универсальные аппроксиматоры.

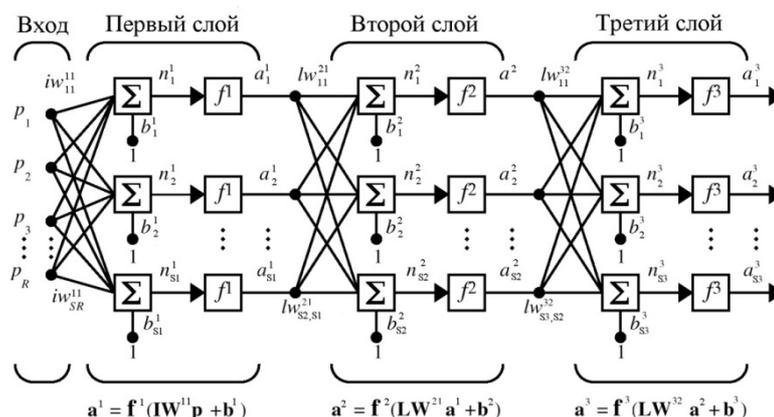


Рис. 3. Обобщенная структура нейронной сети

Благодаря сравнительно быстрым и эффективным алгоритмам обучения; и интерпретируемость накопленных знаний можно с большой уверенностью утверждать, что нейронные сети — очень перспективный инструмент мягких вычислений.

Обычно нечеткие системы трудно применять в реальных системах управления из-за необходимости использования экспертных компетенций при их разработке и внедрении, что не всегда возможно. Эту проблему можно решить, используя адаптивные нечеткие системы. Параметры в таких системах подбираются во время обучения на основе экспериментальных данных. Адаптивные нейронные сети в большинстве случаев требуют более сложных алгоритмов обучения, чем обычные нейронные сети. В рамках обучения адаптивной нейронной сети

рассматривают две основные стадии: генерация лингвистических правил и корректировка функций принадлежности. Первая стадия — задача переборного, а вторую можно отнести к более сложным задачам оптимизации в непрерывных пространствах. Интересно, что возникает парадокс, так как для нечетких правил необходимы функции принадлежности, а для функций — правила. Более того, при автоматизации создания нечетких правил требуется обеспечивать полноту и непротиворечивость этих правил.

Рассмотрим реальную систему управления, модель которой представлена на рис.4, на основе нечетких нейронных сетей. УПТО «РОИН-200» — это многофункциональный комплекс предназначенный для решения задач по инженерному обеспечению спецопераций,

обслуживания объектов инфраструктуры и ликвидации последствий техногенных и природных ЧС. Управление роботом происходит по радиоканалу с использованием средств телеметрии. Технология “multitools”, базирующаяся на использование специального наклонно-поворотного устройства позволяет работать с широким спектром навесного оборудования (планировочный ковш, общеземельный ковш, гидромолот, гидробур, бетонолом, грейферный захват и т. д.), смена которого происходит за считанные минуты без специального инструмента. Задачи реализуемые системой управления данным РТК можно разбить на несколько основных подзадач:

- обеспечение движения звеньев РТК по максимально эффективным траекториям;

- обеспечивать передачи данных между модулями РТК;
- осуществление самодиагностики и наладки РТК без участия оператора;
- быстрая адаптация к изменяющимся условиям окружающей среды.
- эффективная и адекватная реагировать на негативные внешние воздействия.

Для удобства модель системы управления можно разделить на несколько основных блоков в соответствии с их функциональным назначением: блок пульта управления; блок управления стрелой РТК; блок управления системой аутригеров. При этом все структурные компоненты системы жестко взаимосвязаны.

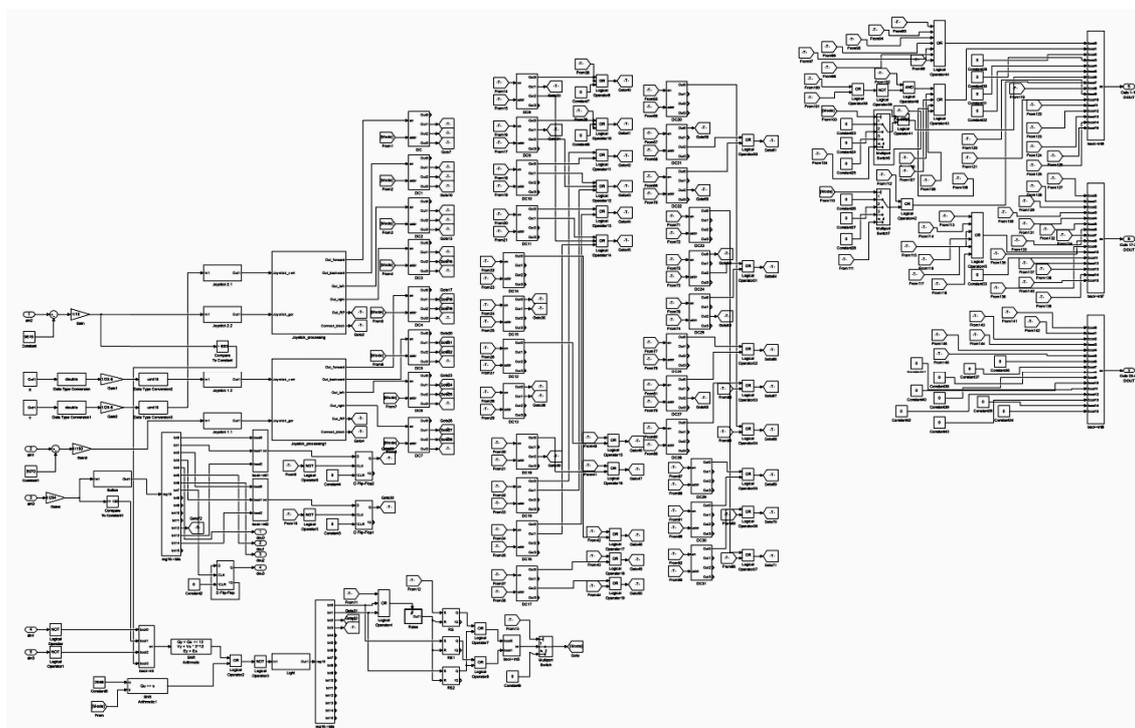


Рис. 4. Математическая модель системы управления РОИН-200

Рассмотрим реальную систему управления, модель которой представлена на рис.4, на основе нечетких нейронных сетей. УПТО «РОИН-200» — это многофункциональный комплекс предназначенный для решения задач по инженерному обеспечению спецопераций, обслуживания объектов инфраструктуры и ликвидации последствий техногенных и природных ЧС. Управление роботом происходит по радиоканалу с использованием средств телеметрии. Технология “multitools”, базирующаяся на использование специального

наклонно-поворотного устройства позволяет работать с широким спектром навесного оборудования (планировочный ковш, общеземельный ковш, гидромолот, гидробур, бетонолом, грейферный захват и т. д.), смена которого происходит за считанные минуты без специального инструмента. Задачи реализуемые системой управления данным РТК можно разбить на несколько основных подзадач:

- обеспечение движения звеньев РТК по максимально эффективным траекториям;

- обеспечивать передачи данных между модулями РТК;
- осуществление самодиагностики и наладки РТК без участия оператора;
- быстрая адаптация к изменяющимся условиям окружающей среды.
- эффективная и адекватная реагировать на негативные внешние воздействия.

Для удобства модель системы управления можно разделить на несколько основных блоков в соответствии с их функциональным назначением: блок пульта управления; блок

управления стрелой РТК; блок управления системой аутригеров. При этом все структурные компоненты системы жестко взаимосвязаны.

Используя нечеткую логику и нейронные сети можно оптимизировать и упростить существующую математическую модель системы управления и привести к соответствию с приведенными выше критериями. Построим нейронную сеть на основе обобщенной модели системы управления (рис.5).

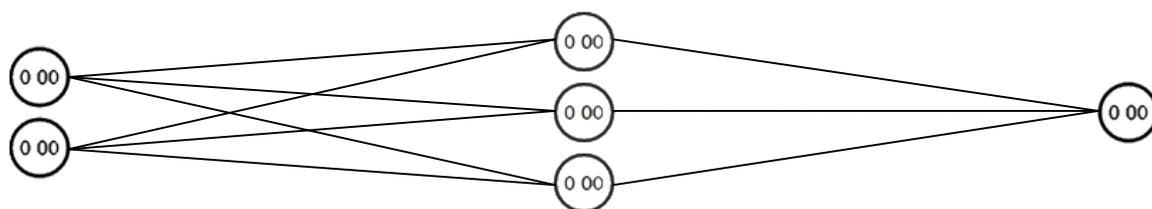


Рис. 5. Нейронная сеть на основе обобщенной математической модели

В данной нейронной сети входными нейронами обрабатывается информация от пульта управления и данные от различных датчиков остальных блоков системы (датчики температуры, давления, акселерометры и т.д.). Скрытый слой сети обрабатывает уже различные функции всей системы, и формируют вектор для исполнительного слоя сети. Для оптимизации всей системы управления на основе существующих математических моделей всех блоков можно разбить на ряд искусственных нейронных сетей, которые в свою очередь можно объединить в глобальную нейронную сеть всего РТК. По сути, имеет место многомерная нейронная сеть, каждый из нейронов скрытого слоя представляет собой самостоятельную нейронную сеть.

Преимущество данного подхода к решению задач управления очевидна: система управления постоянно обучается и с каждой последующей итерацией становится все эффективнее, что в приложении к реальной элементной базе РТК снижается нагрузки на всю систему в целом. Это особенно актуально, т.к. система управления в рассматриваемом случае строится на основе микроконтроллеров семейства STM32,

обладающих недостаточно большой производительностью.

Приведем простой пример эффективности нейронных сетей для решения задач управления РТК: при включении режима автоматического горизонтирования системе управления необходимо оценивать данные сразу от нескольких типов датчиков производить их обработку и формировать управляющие сигналы для его отработки. У алгоритма без использования нечеткой логики данная операция занимает до 3 минут и лишь в 83% случаев заканчивается успешно, т.к. производится по одному заранее заданному сценарию. Но при использовании нейронных сетей каждая последующая операция горизонтирования занимает меньше рабочего времени, т.к. система управления РТК с каждым последующим повторением накапливает больше данных и находит скрытые зависимости между показаниями датчиков и процессом горизонтирования, позволяя оптимизировать соответствующие процессы.

На основе вышеизложенного можно заключить, что нечеткие нейронные сети позволяют существенно повысить эффективность функционирования систем управления РТК.

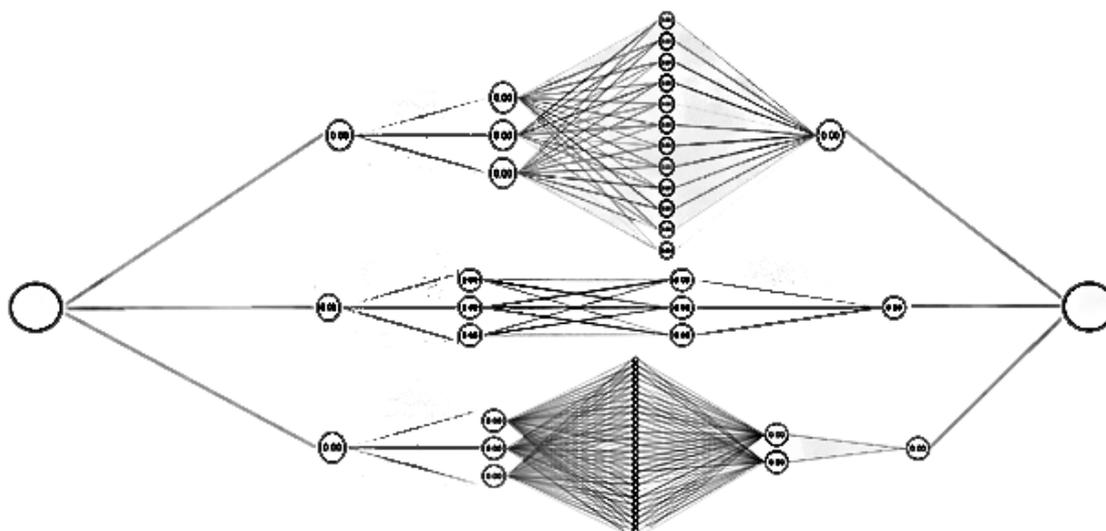


Рис. 6. Обобщенная модель нейронной сети системы управления

Литература

1. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации [Текст] / С. Осовский; пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. Круглов, В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика [Текст] / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 382 с.
3. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика [Текст] / Ф. Уоссермен. – М.: Мир, 1992. – 240 с.
4. Головкин, В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.А. Головкин; под общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.
5. Калан, Р. Основные концепции нейронных сетей [Текст] / Р. Калан. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2001. – 287 с.
6. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи [Текст] / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.
7. Модулярные параллельные вычислительные структуры нейропроцессорных систем [Текст] / Н.И. Червяков, П.А. Сахнюк, А.В. Шапошников, С.А. Ряднов. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
8. Hertz, J.. Wstep do teorii obliczen neuronowych. Wyd. II. / J. Hertz, A. Krogh, R. Palmer. – Warszawa: WNT, 1995/
9. Barren A.R. Approximation and estimation bounds for artificial neural networks / A.R. Barren // Machine learning. – Vol. 14, 1994. – Pp. 115-133.
10. Osowski S. Sieci neuronowe w ujeciu algorytmicznym / S. Osowski. – Warszawa: WNT, 1996.
11. Rosenblatt F. Principle of neurodynamics / F. Rosenblatt. – N.Y.: Spartan, 1992.
12. Weymaere N. On the initialization and optimization of multilayer perceptron / N. Weymaere, J.P. Martens // IEEE Trans. Neural Networks, 1994. – Vol. 5. – Pp. 738-751.288
13. Haykin S. Neural networks, a comprehensive foundation / S. Haykin. – N.Y.: Macmillan Colkst Publishing Company, 1994.
14. Widrow B. Hoff M. Adaptive switching circuits / B. Widrow // Proc. IRE WESCON Convention Record, 1960. – Pp. 107-115.
15. Cichocki A., Unbehauen R. Neural networks for solving systems of linear equations and related problems / A. Cichocki, R. Unbehauen // IEEE Trans. CAS, 1992. – Vol. 39. – Pp. 124-138.

ЗАО МГК «Интехрос», г. Воронеж

Воронежский государственный технический университет

MANAGEMENT ROBOTIC SYSTEMS FUNCTIONING IN EXTREME CONDITIONS BASED ON FUZZY NEURAL NETWORKS

V.Zh. Bocharov, engineer-electronics, ZAO MGK “Intehros”, Voronezh, Russian Federation, e-mail: dr.bocharoff@yandex.ru

V.L. Burkovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: bvl@vorstu.ru

Modern robotic system - a complex system exposed to a number of factors. Extreme environmental conditions can have a major negative impact on the robotic system control or disable it. Under extreme conditions refers to two types of factors: natural (temperature, pressure, air sparseness etc.) and anthropogenic (ionizing radiation, magnetic and electric fields, various overload). To overcome such negative factors of the control system must be highly adaptable. The most obvious output control system based on predictive model is not effective enough for the task. Another approach - RTC control system based on fuzzy neural networks.

For example, RTK UPTO "Roin-200" control system mathematical model, which is designed for fuzzy neural network, hidden layer which consists of several nested neural networks perform various management functions RTC (remote control,

RTC boom and outriggers control unit) units. Developed on the basis of these ideas neural network implemented in Roin RTC-200 control system has achieved productivity gains, and seriously optimize the control system.

Based on the above it can be concluded that the fuzzy neural networks can significantly improve the efficiency of the control RTK systems

Key words: management, robotics, extreme conditions, fuzzy logic, neural networks, optimization

References

1. Osovskij S. Nejrionnye seti dlja obrabotki informacii [Neural networks for information processing] / Per. s pol'skogo I.D. Rudinskogo. – M.: Finansy i statistika, 2002. – 344 s.
2. Kruglov V.V., Borisov V.V. Iskusstvennye nejrionnye seti. Teorija i praktika [Artificial neural network. Theory and practice]. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2002. – 382 s.
3. Uossermen F. Nejrionnye seti: Teorija i praktika [Neurocomputer technique: Theory and practice]. – M.: Mir, 1992. – 240 s.
4. Golovko V.A. Nejrionnye seti: obuchenie, organizacija i primenenie [Neural networks: training, organization and application] / ed. A.I. Galushkina. – M.: IPRZhR, 2001. – 256 s.
5. Kalan R. Osnovnye koncepcii nejrionnyh setej [Basic concepts of neural networks]. – M.: Izdatel'skij dom "Vil'jams", 2001. – 287 s.
6. Komashinskij V.I., Smirnov D.A. Nejrionnye seti i ih primenenie v sistemah upravlenija i svjazi [Neural networks and their applications in systems and control]. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2002. – 94 s.
7. Chervjakov N.I., Sahnjuk P.A., Shaposhnikov A.V., Rjadnov S.A. Moduljarnye parallel'nye vychislitel'nye struktury nejrionnyh setej [Modular parallel computing structures of connected systems] – M.: Fizmatlit, 2003. – 288 s.
8. Hertz J., Krogh A., Palmer R. Wstep do teorii obliczen neuronowych. Wyd. II. [Introduction to the theory of neural computation. Ed. II.] – Warszawa: WNT, 1995/
9. Barren A.R. Approximation and estimation bounds for artificial neural networks. Machine learning. – Vol. 14, 1994. – Pp. 115-133.
10. Osowski S. Sieci neuronowe w ujeciu algorytmicznym [Neural networks in ujeciu algorytmicznym]. – Warszawa: WNT, 1996.
11. Rosenblatt F. Principle of neurodynamics. – N.Y.: Spartan, 1992.
12. Weymaere N., Martens J.P. On the initialization and optimization of multilayer perception // IEEE Trans. Neural Networks, 1994. – Vol. 5. – Pp. 738-751.288
13. Haykin S. Neural networks, a comprehensive foundation. – N.Y.: Macmillan Colkst Publishing Company, 1994.
14. Widrow V., Hoff M. Adaptive switching circuits // Proc. IRE WESCON Convention Record, 1960. – Pp. 107-115.
15. Cichocki A., Unbehauen R. Neural networks for solving systems of linear equations and related problems // IEEE Trans. CAS, 1992. – Vol. 39. – Pp. 124-138.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ
МОДУЛЕЙ ТРЕТЬЕГО УРОВНЯ СРЕДСТВАМИ CREO PARAMETRIC 3.0**

П.В. Иевлев, А.В. Муратов, С.А. Слинчук, Т.Л. Тураева, А.В. Турецкий

В конечно-элементных моделях размер элемента – важнейший параметр, который, с одной стороны, определяет точность результатов моделирования, с другой стороны, определяет уровень сложности самой модели. Поэтому основная проблема в создании конечно-элементной модели заключается в выборе оптимального размера элемента, который позволит получить адекватный результат и в то же время максимально упростить модель.

В работе представлены систематические исследования влияния размера и формы конечных элементов на точность результатов численного анализа в программном САД комплексе CREO Parametric 3.0 с целью выработки рекомендаций по выбору оптимального размера при моделировании механических воздействий на радиоэлектронные модули третьего уровня. В качестве объектов исследования выбраны основные конструктивные составляющие стандартного радиоэлектронного шкафа: прямоугольная стальная пластина размером 200×300 мм² толщиной 3 мм и стальной равнополочный уголок толщиной 2,5 мм с шириной полки 30 мм и длиной 500 мм.

Проведен модальный анализ конструкционных элементов, закрепленных с одной стороны, и статический анализ для такого же закрепления. При этом на свободную сторону пластины действовала статическая сила, создающая вращательный момент 0,9 Н·м, а на свободную сторону уголка – статическая сила 10 Н. Определены низкочастотные моды собственных колебаний, проанализирована сходимости полученных результатов и оценены относительные отклонения от величины, полученной для самой мелкой сетки конечных элементов.

По результатам анализа сформулированы рекомендации по выбору размера конечных элементов для моделирования конструкций радиоэлектронных модулей третьего уровня. Для статического анализа оптимальным в части конкуренции точности полученных результатов и ресурсов ЭВМ является максимальный размер элемента $L/30$, при модальном анализе достаточно еще более крупной сетки с размером элемента $L/10$, где L – длинная сторона элемента конструкции

Ключевые слова: радиоэлектронные модули, проектирование, конечно-элементная модель, статический анализ, модальный анализ

Постоянное усложнение современных радиоэлектронных средств (РЭС) и условий их эксплуатации, повышение стоимости их разработки, производства и испытаний диктуют необходимость оптимизации всех этапов создания РЭС. При этом все большее внимание последние годы уделяется одному из наиболее сложных и наукоемких этапов жизненного цикла изделий радиоэлектронной промышленности – этапу проектирования. На этом этапе, когда задача состоит в выборе альтернативных вариантов конструкции изделия или ее параметров, наиболее эффективно применение методов и средств моделирования. Использование методов и средств вычислительной техники позволяет значительно сократить сроки разработки РЭС, эксплуатируемых в нестандартных условиях: конструкции РЭС устанавливаются на подвижных объектах, вблизи подвижных объектов или в сейсмически активных зонах.

Проблема защиты РЭС от статических нагрузок, ударов и вибраций является наиболее сложной. Поэтому задача выбора параметров конструкций, обеспечивающих надежное функционирование в условиях сложных динамических воздействий, является актуальной.

В настоящее время численное моделирование прототипа радиоэлектронной структуры, проверка функциональности и целостности структуры до экспериментальной проверки – обычная мировая практика. Часто эта задача усложнена требованиями минимизации габаритов конструкции и массы. Для ее решения необходимо оценить статические и динамические характеристики РЭС. Применение точных аналитических методов при решении таких задач сопряжено с большими трудностями, а иногда, становится невозможным. Эффективным инструментом в таких случаях является математическое моделирование с использованием современных средств САПР [1-3]. Алгоритм моделирования содержит две части: 1) построение адекватной модели; 2) ее исследование и анализ полученных результатов [4]. Основная роль здесь отводится дискретным моделям, ориентированным на использование численных методов, одним из которых является метод конечных элементов (МКЭ).

Иевлев Павел Валерьевич – ВГТУ, аспирант,
e-mail: ievlev92@mail.ru

Муратов Александр Васильевич, – ВГТУ, д-р техн. наук,
профессор, e-mail: kipr@vorstu.ru

Слинчук Светлана Александровна – ВГТУ, канд. техн.
наук, доцент, e-mail: VGTU-kafRT@yandex.ru

Тураева Татьяна Леонидовна – ВГТУ, канд. физ.-мат.
наук, доцент, e-mail: tlturaeva@mail.ru

Турецкий Андрей Владимирович – ВГТУ, канд. техн.
наук, доцент, e-mail: tav7@mail.ru

Конструкции современной радиоэлектронной аппаратуры промышленного и военного назначения представляют собой сложнейшие модульные системы, которые должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к аппаратуре соответствующего класса, назначения и места установки. При этом особое место в конструктивной иерархии РЭС занимают модули третьего уровня, к числу которых относят независимые, самоподдерживаемые конструкции, предназначенные для размещения в них радиоэлектронного оборудования (шкафы, стойки, стеллажи и т.п.) [5].

При конструировании необходимо учитывать особенности проектирования модулей третьего уровня. С одной стороны, сокращение сроков разработки и производства, снижение себестоимости достигается стандартизацией основных параметров и типоразмеров [6], с другой стороны, нет необходимости получения в результате конструирования полностью конструктивно завершенного модуля 3 уровня в отличие от модулей 1 и 2 уровней. В этом случае следует предусмотреть возможность внесения изменений в конструкцию для создания различных модификаций модуля. Пример покомпонентного изображения типового радиоэлектронного шкафа представлен на рис. 1.

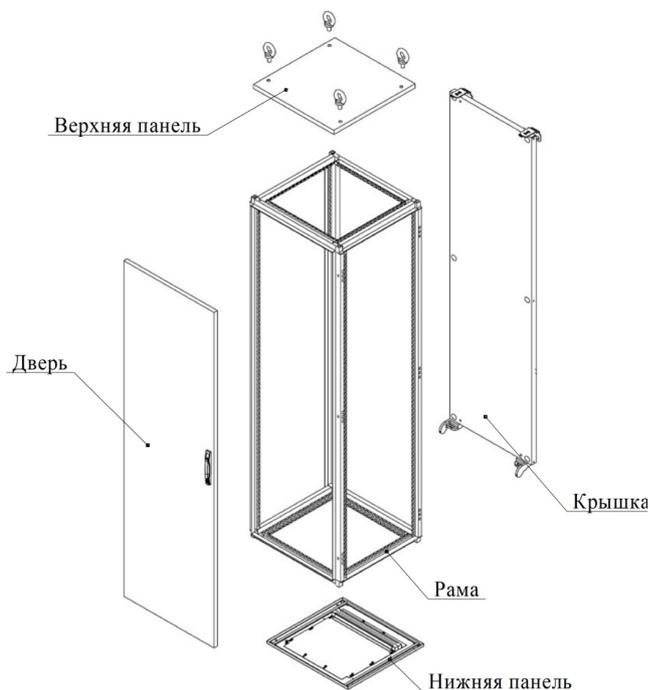


Рис. 1. Компоненты типового радиоэлектронного шкафа

Конструктивную основу шкафов, стоек, стеллажей составляют вертикальные и горизонтальные стальные уголкового профиля или трубы с толщиной стенки, в среднем, 2,5 мм. Каркас чаще всего цельносварной. В качестве

элементов жесткости используют систему перегородок и рам, а для размещения модулей 2 уровня – направляющие из стальных профилей или уголков. В стойках и шкафах, кроме каркаса, есть боковые и задняя стенки, верхняя крышка, а также двери, которые изготавливаются из листовой стали толщиной 1,5 – 2 мм.

Таким образом, основные конструктивные элементы модуля 3 уровня могут быть отнесены к плоским и балочным конструкциям. Это делает возможным при моделировании МКЭ использование наряду с 3D тетраэдрическими элементами 2D призматических элементов, высота которых равна толщине элемента конструкции.

Точность результатов, полученных в рамках МКЭ, и время, требуемое для проведения вычислений, определяются размером конечных элементов или плотностью сетки. Согласно теории МКЭ использование модели с малыми размерами элементов дает более точные результаты, но требует значительно большего времени расчетов и ресурсов вычислительной техники. И наоборот, модель с крупной сеткой (большим размером элемента) дает меньшую точность результатов при значительной экономии во времени [7,8]. Поэтому целесообразно использовать высокую степень дискретизации когда требуется высокая точность расчетов, а для быстрой оценки параметров отклика конструкции на механические воздействия можно использовать элементы больших размеров. Таким образом, проблема выбора размера конечных элементов с целью нахождения разумного компромисса между точностью и временем счета является актуальной.

В то же время никаких нормативных документов, касающихся выбора размера и формы конечных элементов нет. К настоящему времени опубликованы немногочисленные работы по исследованию влияния размеров и формы конечных элементов на точность результатов вычислений [9-11]. На основании анализа опубликованных работ была определена цель настоящей работы – выработка рекомендаций по выбору размера и формы конечных элементов при проектировании радиоэлектронных модулей (РЭМ) 3 уровня. Для этого были проведены модальный анализ и анализ откликов на механические воздействия для элементов конструкций, на основе которых создают РЭМ 3 уровня: стальные пластины (крышки, боковые поверхности, двери) и уголкового стальные профили (каркас радиоэлектронной стойки и шкафа). Моделирование проводили в программном комплексе CREO Parametric 3.0.

Основные результаты и обсуждение Статический анализ

Статический анализ выполнен на примере прямоугольной стальной пластины размером 200×300 мм² и толщиной 3 мм. Механические свойства материала пластины представлены в табл. 1.

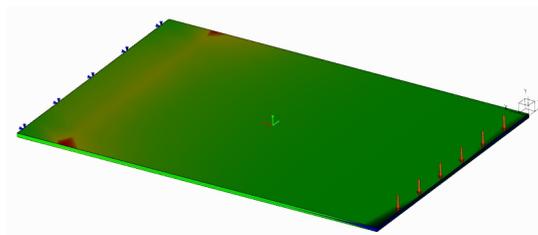
Таблица 1

Механические свойства стали

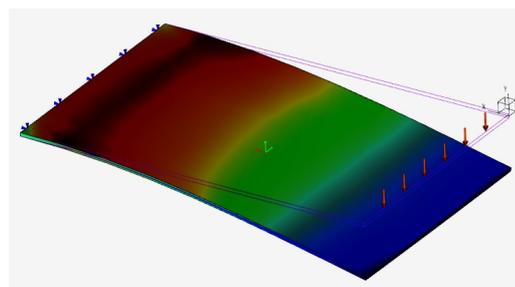
Модуль Юнга, ГПа	200
Плотность, кг/м ³	7820
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести, МПа	205
Предел прочности, МПа	450

Одна короткая сторона пластины была закреплена, к другой приложена сила 3Н,

создающая момент относительно оси, проходящей через точки закрепления пластины, величиной 0,9 Н·м (рис. 2а). При таком воздействии происходит деформация, показанная на рис. 2б, при которой элементы пластины смещаются от начального положения в направлении действия силы, причем смещение возрастает от нуля для точек закрепленной стороны до максимального значения для точек свободной стороны (рис. 3).



а)



б)

Рис. 2. Статическое воздействие на стальную пластину: а) граничные условия; б) деформация пластины

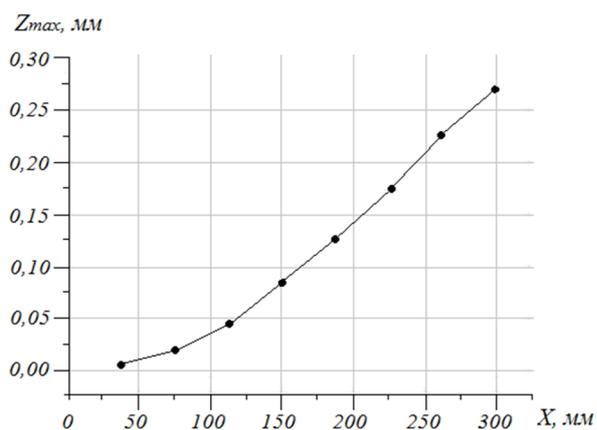
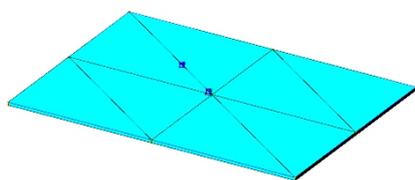
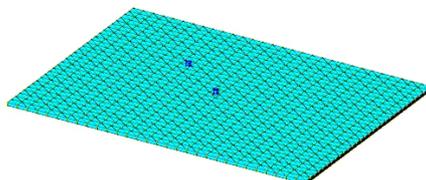


Рис. 3. Зависимость смещения точек пластины от расстояния от точки наблюдения до линии закрепления

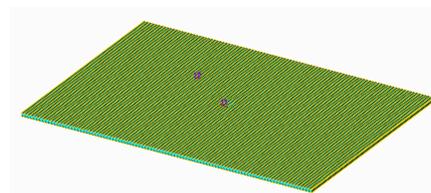
Для определения максимального смещения точек пластины и максимального напряжения, возникающего в пластине, были сгенерированы МКЭ с различным размером элементов и, как следствие, с различным количеством конечных элементов N в пластине. Использовали два типа конечных элементов: призматические с шестью вершинами, причем высота каждого элемента была равна толщине пластины, и тетраэдрические. На рис. 4 показаны модели с призматическими элементами для крупного разбиения с $N = 8$ (рис. 4а), среднего с $N = 1800$ (рис. 4б) и мелкого с $N = 20000$ (рис. 4в). При этом количество элементов вдоль длинной стороны пластины составляло $n = 2, 30$ и 100 элементов соответственно.



а)



б)



в)

Рис. 4. Конечно-элементные модели пластины с различной плотностью сетки: а) $N = 8$; б) $N = 1800$; в) $N = 20000$

В табл. 2 представлены значения максимальных смещений и напряжений, возникающих в пластине при статической нагрузке для различных конечно-элементных моделей с

призматическими элементами, а также относительные погрешности определения этих величин в процентах и машинное время, затраченное на получение результатов.

Результаты анализа статического воздействия на пластину в модели призматических элементов

Количество элементов вдоль длинной стороны пластины	Количество элементов в пластине, N	Максимальное смещение x_{\max} , мм	$\frac{\Delta x_{\max}}{x_{\max}}$, %	Максимальное напряжение σ_{\max} , МПа	$\frac{\Delta \sigma_{\max}}{\sigma_{\max}}$, %	Время t, с
2	8	0,2843	0,76	2,73900	9,5	1,55
5	50	0,28569	0,28	2,82204	6,8	1,54
10	200	0,28614	0,12	2,95194	2,5	2,45
20	800	0,28636	0,05	3,01864	0,25	7,79
30	1800	0,28642	0,025	3,03887	0,45	16,0
40	3200	0,28645	0,014	3,04575	0,67	29,82
50	5000	0,28647	0,007	3,04638	0,69	43,93
60	7200	0,28648	0,004	3,04368	0,6	86,54
70	9800	0,28648	0,004	3,03900	0,45	118,24
80	12800	0,28649	0	3,03433	0,3	196,3
90	16200	0,28649	0	3,02946	0,13	285,93
100	20000	0,28649	0	3,02551	0	405,7

На основании представленных результатов построены графики зависимостей x_{\max} и σ_{\max} от количества призматических элементов в модели (рис. 5), из которых видна хорошая сходимость полученных результатов. Погрешности $\frac{\Delta x_{\max}}{x_{\max}}$ и

$\frac{\Delta \sigma_{\max}}{\sigma_{\max}}$ были рассчитаны как относительные

отклонения от величины, полученной для самой мелкой сетки с $N = 20000$. Зависимости погрешностей и времени счета от количества элементов графически показаны на рис. 6.

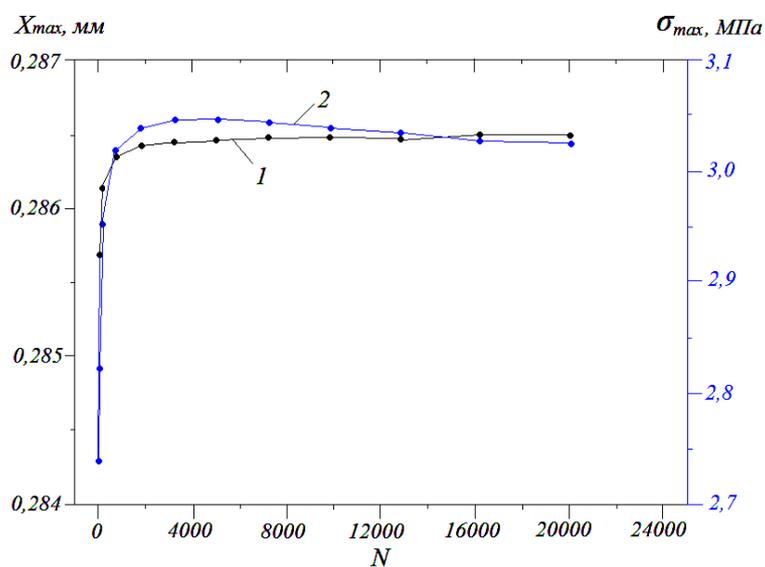


Рис. 5. Графики зависимостей параметров деформации от количества призматических элементов: кривая 1 — $X_{\max}(N)$; кривая 2 — $\sigma_{\max}(N)$

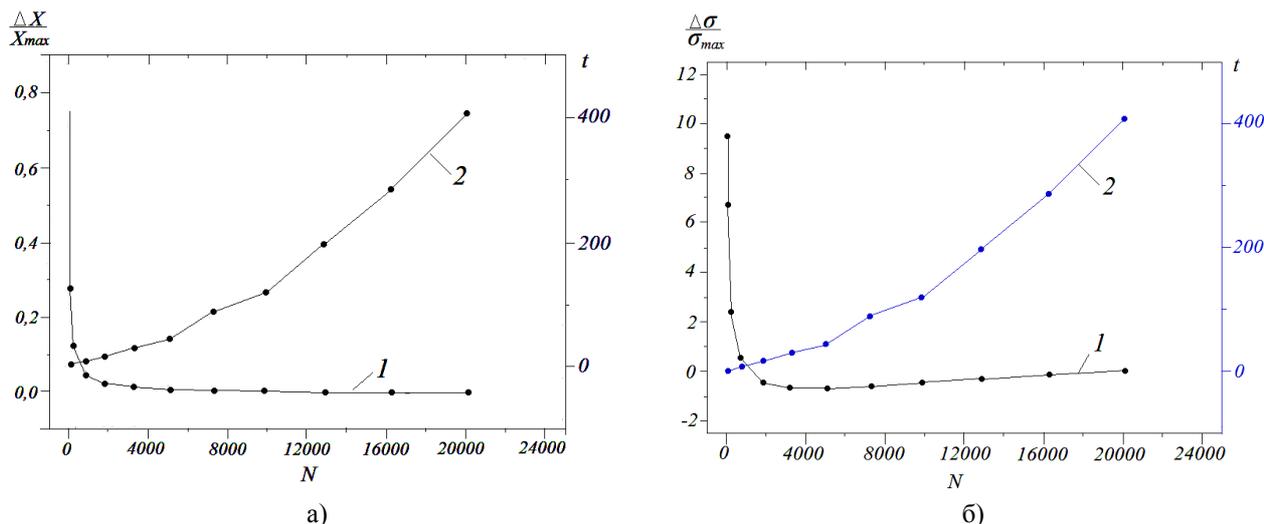


Рис. 6. Графики зависимостей погрешностей определения максимального смещения (кривая 1, рис. 6а) и напряжения (кривая 1, рис. 6б) и времени счета от количества призматических элементов (кривая 2)

Анализ полученных результатов показывает, что погрешность определения смещения частиц от начального положения на порядок меньше, чем погрешность определения напряжений. Такой результат является закономерным, так как согласно конечно-элементной теории, напряжения рассчитываются на основе величин перемещений.

Различия максимальных смещений, полученных в рамках модели с $N = 8$ (самая крупная сетка конечных элементов) и с $N = 20000$ (самая мелкая сетка конечных элементов) составляет менее 0,8 %, а аналогичные различия при определении напряжений – менее 10 %, что является вполне приемлемым при моделировании. При этом следует отметить, что время счета в рамках грубой модели с $N = 8$ 1,55 с, что составляет примерно 1/300 времени счета в рамках мелкой модели с $N = 20000$. Для моделей с $N \geq 20$ увеличение плотности сетки приводит к незначительному увеличению точности результатов при определении напряжения и с $N \geq 30$ – при определении смещения, но вместе с тем к очень значительному увеличению длительности выполнения расчетов.

Подобный статический анализ стальной пластины тех же размеров был проведен с использованием конечных элементов и тетраэдрической формы. Создана серия моделей с количеством конечных элементов тетраэдрической формы от 319 до 37100. Установлено, что при использовании таких элементов при дискретизации тонкой пластины наблюдается хорошая сходимость результатов при определении максимального смещения, причем максимальный процент относительной погрешности (0,37 %) оказался вдвое ниже, чем для призматических элементов (0,76 %). Абсолютные значения максимальных смещений, полученные при моделировании призматическими и тетраэдрическими элементами, практически не отличаются.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что оптимальное соотношение точности результатов и затрачиваемых на расчет ресурсов дает модель пластины, построенная на основе призматических элементов, когда вдоль длинной стороны расположено 30 элементов, т.е. максимальный размер элемента составляет $L/30$, где L – линейный размер пластины.

Аналогичные исследования проведены для конструкционного стального равнополочного уголка толщиной 2,5 мм с шириной полок $d = 30$ мм и длиной $L = 500$ мм. Уголок с одной короткой стороны закреплен, на другую короткую сторону действует статическая нагрузка 10 Н. Разбиение уголка проводили на тетраэдрические и пентаэдрические элементы. Установлено, что оптимальным является разбиение на пентаэдрические элементы с максимальным размером элемента $d/3$.

Модальный анализ

Проведен модальный анализ стальной пластины размером 200×300 мм² и толщиной 3 мм, закрепленной с одной стороны (рис. 1), для определения собственных частот и мод колебаний во время свободной вибрации. Созданы те же серии конечно-элементных моделей, что и при статическом анализе на базе призматических и тетраэдрических элементов. Исследование ограничились первыми четырьмя низкими частотами, так как при эксплуатации РЭМ третьего уровня низкочастотные воздействия преобладают над высокочастотными.

В таблицах 3 и 4 представлены результаты исследования зависимостей собственных частот пластины от количества конечных элементов. Исследования проведены для призматических и тетраэдрических элементов.

Таблица 3

Собственные частоты стальной пластины в рамках модели призматических элементов

Количество элементов вдоль длинной стороны пластины	Количество элементов в пластине	ν_1 , Гц	ν_2 , Гц	ν_3 , Гц	ν_4 , Гц
2	8	28,3203	95,0558	175,874	320,855
5	50	28,1646	94,7057	175,041	320,068
10	200	28,0942	94,4657	174,543	318,782
20	800	28,0608	94,3385	174,330	318,228
30	1800	28,0499	94,2803	174,260	318,026
40	3200	28,0447	94,2540	174,227	317,920
50	5000	28,0417	94,2408	174,208	317,864
60	7200	28,0398	94,2333	174,196	317,832
70	9800	28,0385	94,2288	174,188	317,813
80	12800	28,0376	94,2258	174,182	317,800
90	16200	28,0369	94,2238	174,178	317,792
100	20000	28,0365	94,2225	174,175	317,786

Таблица 4

Собственные частоты стальной пластины в рамках модели тетраэдрических элементов

Максимальный размер элемента, мм	Количество элементов в пластине	ν_1 , Гц	ν_2 , Гц	ν_3 , Гц	ν_4 , Гц
60,0	319	28,1622	94,9143	174,996	322,681
50,0	476	28,0915	94,6823	174,766	320,871
35,0	594	28,0753	94,5497	174,462	319,42
30,0	798	28,0633	94,4308	174,354	318,602
25,0	1083	28,067	94,3946	174,366	318,413
20,0	1592	28,0567	94,3661	174,301	318,277
18,0	1875	28,0543	94,3505	174,286	318,239
13,5	3277	28,0511	94,3217	174,266	318,128
11,0	4881	28,0451	94,2951	174,234	318,039
9,0	7333	28,0427	94,2721	174,216	317,957
7,8	9668	28,0405	94,2567	174,201	317,905
6,8	12771	28,039	94,2458	174,191	317,865
6,0	16399	28,0378	94,2404	174,184	317,844
5,4	20364	28,037	94,2369	174,18	317,833
4,0	37100	28,0359	94,2272	174,172	317,798

Сопоставление табл. 3 и 4 показывает, что значения собственных частот, полученные при моделировании элементами различной формы, отличаются незначительно, имеют хорошую сходимость, при этом относительная погрешность в обоих случаях не превышает 1%.

На рис. 7 а-г показаны моды колебаний, соответствующие частотам ν_1 , ν_2 , ν_3 и ν_4 соответственно, для случая разбиения на призматические элементы с общим количеством $N = 200$.

Модальный анализ стального равнополочного уголка толщиной 2,5 мм с шириной полки $d = 30$ мм и длиной $L = 500$ мм позволил определить собственные частоты при моделировании тетраэдрическими и

пентаэдрическими элементами: 67 Гц, 108 Гц, 211 Гц и 412 Гц. Установлено, что форма конечных элементов существенного влияния на результаты не оказывает, однако меньшую погрешность обеспечивают, как и в случае статического анализа, пентаэдрические элементы.

На основании результатов, полученных при модальном анализе, установлено, что все вышеописанные МКЭ с различным количеством и формой элементов позволяют определить собственные частоты колебаний с погрешностью, не превышающей 1%. Это объясняется тем, что результаты модального анализа зависят только от массы и коэффициента жесткости конструкции.

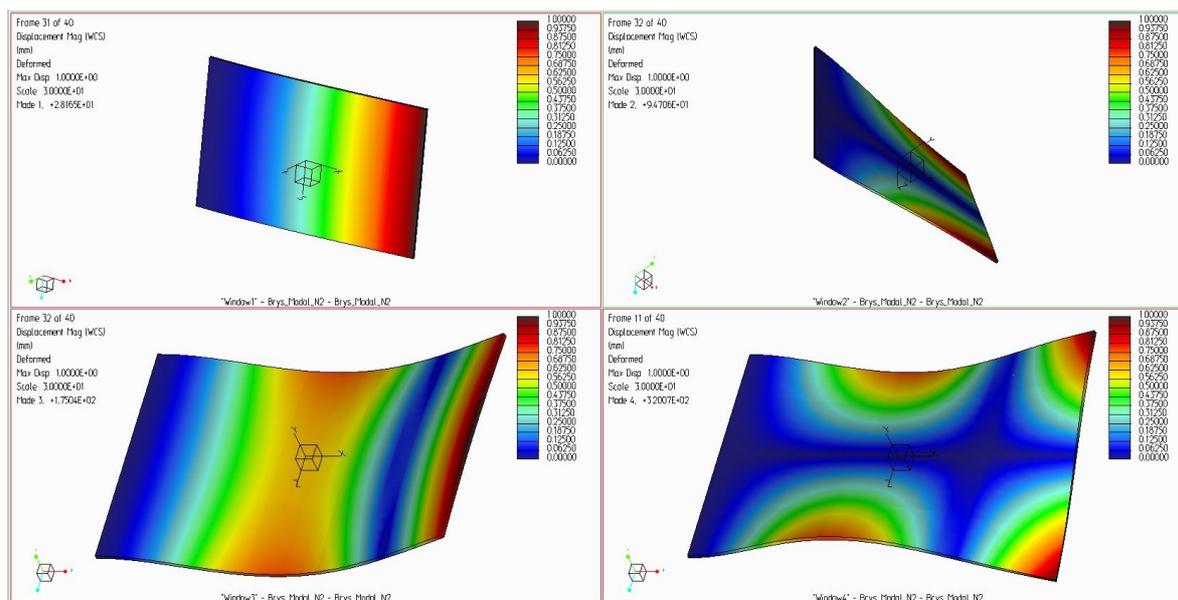


Рис. 7. Низкочастотные моды собственных колебаний стальной пластины

Таким образом, на этапе конструирования нет необходимости в использовании модели с мелкой сеткой, использование которой требует значительных временных затрат и компьютерных ресурсов, - достаточно сетки с максимальным размером конечных элементов $L/10$, где L – длинная сторона элемента конструкции.

Основные выводы

В данной работе исследовано влияние размеров и формы конечных элементов на точность результатов моделирования поведения стальной тонкостенной пластины и стального тонкостенного уголкового профиля, как основных конструктивных элементов радиоэлектронных модулей третьего уровня. Сформулированы рекомендации по выбору размера конечных элементов для моделирования: для статического анализа оптимальным в части конкуренции точности полученных результатов и ресурсов ЭВМ является максимальный размер элемента $L/30$, при модальном анализе достаточно еще более крупной сетки с размером элемента $L/10$, где L – длинная сторона элемента конструкции.

Литература

1. Процедуры инженерного анализа механических воздействий на РЭС в системе PRO/ENGINEER [Текст] / И.А. Лозовой, С.Ю. Сизов, А.В. Турецкий, В.А. Шуваев // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2011. -Т. 7. -№ 5. -С. 26-27.
2. Моделирование механических характеристик радиоэлектронных модулей третьего уровня [Текст] / П.В.Иевлев, А.И.Климов, А.В.Муратов, Ю.В. Сидоров, А.В.Турецкий // Радиотехника. - 2014. - № 11. - С. 37-40.

3. Белецкая, С.Ю. Применение экспертных систем при проектировании печатных плат с учетом требований по механической прочности [Текст] / С.Ю. Белецкая, П.В. Иевлев, А.В. Турецкий // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № - 6-3. С. 33-35.

4. Этапы моделирования механических характеристик радиоэлектронных модулей третьего уровня [Текст] / П.В. Иевлев, А.И. Климов, А.В. Муратов, Ю.В. Сидоров, А.В. Турецкий // Радиотехника. - 2014. - № 11. - С. 41-43.

5. ГОСТ Р 52003-2003. Уровни разукрупнения РЭС. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2003-01-09. – М.: Стандартинформ, 2005.

6. ГОСТ Р 51623-2000. Конструкции базовые несущие радиоэлектронных средств. Система построения и координационные размеры. [Текст]. – Введ. 2001-01-01. – М.: Стандартинформ, 2005.

7. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы [Текст] / Р. Галлагер.- М.: Мир, 1984, 428 с.

8. Журбин, О.В. Анализ инженерных конструкций методом конечных элементов [Текст] / О.В. Журбин, С.Д. Чижимов. - Комсомольск-на-Амуре, КГТУ, 2004. - 157 с.

9. Seismic analysis of electronic cabinet using ANSYS / Anjum M.V., Khalid B., Rehman A // Technical Journal. University of Engineering and Technology Taxila, 2012.

10. Хвалько, А.А. Алгоритмы и программа моделирования напряженно – деформированного состояния унифицированных конструкций бортовой радиоэлектронной аппаратуры перспективных спутниковых платформ при механических воздействиях [Текст]: автореферат дис. канд. физ.-мат. наук / А.А. Хвалько. – Томск, 2011.

11. O. Effect of elements on linear elastic stress analysis: a finite element approach / Mun W.C., Rivai A., Bapokutty // Int. J. of research in engineering and technology. 2013. V.2 №10. P. 561 – 567.

OPTIMIZATION OF PROCESSES OF PROJECTION OF RADIO-ELECTRONIC MODULES OF THE THIRD LEVEL MEANS OF CREO PARAMETRIC 3.0

P.V. Ievlev, Graduate, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: ievlev92@mail.ru
A.V. Muratov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kivr@vorstu.ru
S.A. Slinchuk, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: VGTU-kafRT@yandex.ru
T.L. Turaeva, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: tlturaeva@mail.ru
A.V. Turetsky, Candidate of technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: tav7@mail.ru

In final and element models the element size – the major parameter which, on the one hand, determines the accuracy of results of modeling, on the other hand, determines the level of complexity of the model. Therefore the main problem in creation of final and element model consists in the choice of the optimum size of an element which will allow to receive adequate result and, at the same time, as much as possible to simplify model.

In work systematic researches of influence of the size and a form of finite elements on accuracy of results of a numerical analysis in program CAD the CREO Parametric 3.0 complex for the purpose of development of recommendations about the choice of the optimum size at model operation of mechanical impacts on radio-electronic modules of the third level are presented. As objects of a research the main design components of a reference radio-electronic case are chosen: a rectangular steel plate of 200×300 mm² in size with a thickness of 3 mm and a steel equalpolochny corner 2,5 mm thick with a width of shelves of 30 mm and 500 mm long.

Also the static analysis for the same fixing is carried out modal the constructional elements fixed on the one hand. At the same time the free party of a plate the static force creating an angular momentum 0,9 H·m and affected the free party of a corner – static force of 10 N. Low-frequency fashion of eigentones is defined, convergence of the received results is analysed and the relative deviations from the size received for the most shallow grid of finite elements are estimated.

By results of the analysis recommendations about the choice of the size of finite elements for model operation of designs of radio-electronic modules of the third level are formulated. For the static analysis regarding the competition of accuracy of the received results and the COMPUTERS resources the maximal size of the L/30 element is optimum, in the modal analysis even more alligating with a size of the L/10 element where L – the lengthiest party of a structural element is enough

Key words: radio-electronic modules, projection, terminating and element model, static analysis, modal analysis

References

1. Lozovoj I.A., Sizov S.Ju., Tureckij A.V., Shuvaev V.A. Procedury inzhenerenogo analiza mehanicheskikh vozdeystvij na RJeS v sisteme PRO/ENGINEER [Procedures Of The Engineering Analysis Mechanical Characteristics On Radio-Electronic Means In System Pro/Engineer] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. - 2011. -T. 7. -№ 5. -P. 26-27.
2. Ievlev P.V., Klimov A.I., Muratov A.V., Sidorov Ju.V., Tureckij A.V. Modelirovanie mehanicheskikh harakteristik radioelektronnykh modulej tret'ego urovnja [Simulation of mechanical characteristics radioelectronic modules third level] // Radiotekhnika. 2014. № 11. P. 37- 40.
3. Beleckaja S.Ju., Ievlev P.V., Tureckij A.V. Primenenie jekspertnykh sistem pri proektirovanii pechatnykh plat s uchetom trebovanij po mehanicheskoj prochnosti [Use Of Expert Systems At Design Of Pcb Taking Into Account Requirements For Mechanical Durability] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2013. T. 9. № 6-3. P. 33-35.
4. Ievlev P.V., Klimov A.I., Muratov A.V., Sidorov Ju.V., Tureckij A.V. Jetapy modelirovanija mehanicheskikh harakteristik radioelektronnykh modulej tret'ego urovnja [Modeling stage mechanical characteristics radio electronic module third level] // Radiotekhnika. 2014. № 11. P. 41-43.
5. GOST R 52003-2003. Urovni razukrupnenija RJeS. Terminy i opredelenija [Tekst]. – Vved. 2003-01-09. – M.: Standartinform, 2005.
6. GOST R 51623-2000. Konstrukcii bazovye nesushhie radioelektronnykh sredstv. Sistema postroenija i koordinacionnye razmery. [Tekst]. – Vved. 2001-01-01. – M.: Standartinform, 2005.
7. Gallager R. Metod konechnykh jelementov. Osnovy [The finite element method. The basics]. M.: Mir, 1984, 428 p.
8. Zhurbin O.V., Chizhiumov S.D. Analiz inzhenernykh konstrukcij metodom konechnykh jelementov [Analysis of engineering structures by the finite element method]. Komsomol'sk-na-Amure, KGTU, 2004, 157 p.
9. Anjum M.V., Khalid B., Rehman A. Seismic analysis of electronic cabinet using ANSYS. Technical Journal. University of Engineering and Technology Taxila, 2012.
10. Hval'ko A.A. Algoritmy i programma modelirovanija naprjazhenno – deformirovannogo sostojanija unificirovannykh konstrukcij bortovoj radioelektronnoj apparatury perspektivnykh sputnikovyh platform pri mehanicheskikh vozdeystvijah [Algorithms and software for modeling the stress – strain state of the standard structures of the onboard avionics of advanced satellite platforms at mechanical influences]. Avtoreferat diss. na soisk. uch. step. kand. fiz.-mat. nauk. Tomsk. 2011.
11. Mun W.C., Rivai A., Bapokutty O. Effect of elements on linear elastic stress analysis: a finite element approach. Int. J. of research in engineering and technology. 2013. V.2 №10. P. 561 – 567.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ЗАДАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРЕНИРОВКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В.В. Кондусов, В.А. Кондусов

В статье приводится описание возможностей, характеристик, а также примененных методик и средств разработки автоматизированной установки, использующейся для задания тепловых режимов при термоэлектрической тренировке полупроводниковых приборов. Представленная установка является составной частью программно-аппаратного комплекса для термоэлектрической тренировки полупроводниковых приборов в корпусах типа КТ-99-1 и 4601.3-1. В статье дано описание функциональной схемы установки, описана система управления, построенная на микроконтроллере, представлен процесс твердотельного моделирования корпуса и кинематических систем установки с использованием системы SolidWorks. Дано описание терморегулирующей подсистемы, основанной на ПИД-контроллере температуры TCN4S и используемой для задания и точного поддержания температуры рабочей зоны. Описан процесс исследования температурных характеристик рабочей зоны установки с применением гибких термоэлектрических преобразователей ТСП 9703, подключенных к многоканальному прецизионному измерителю температуры МИТ-8 с функцией самописца с выходом на ПК. По результатам исследований температурных характеристик представлены данные, указывающие на оптимальный выбор материалов и конструкции рабочей зоны. Представлено описание основного узла установки – контактного устройства, снабженного игольчатыми подпружиненными контактами, панель которого изготовлена из аморфного материала с очень высокой прочностью и жесткостью - полиэфиримида (PEI).

Ключевые слова: задатчик режимов, температурный ПИД-контроллер, система Solidworks, контактирующее устройство

Измерения электрических параметров полупроводниковых приборов при их производстве является важнейшей частью технологического процесса. Результаты таких измерений служат для определения их эксплуатационных возможностей, являются исходным материалом при расчете схем, а с другой стороны, позволяют косвенным образом судить о внутренних свойствах и особенностях приборов [1].

Разработанная установка является составной частью программно-аппаратного комплекса для измерения тепловых параметров полупроводниковых приборов в корпусах типа КТ-99-1 и 4601.3-1, предназначена для совместного использования с задатчиком режимов и обеспечивает тестирование и снятие характеристик полупроводниковых приборов при температуре до 150°C. Количество одновременно тестируемых приборов – 50 шт. Электрическая функциональная схема установки приведена на рис. 1.

Основой установки является контактирующее устройство (КУ), предназначенное для загрузки 50 полупроводниковых приборов в корпусах КТ-99-1 с игольчатыми пружинными выводами от каждого прибора на внешнюю панель разъёмов установки для последующего соединения с задатчиком режимов. Контактное устройство представляет собой панель из аморфного материала - полиэфиримида (PEI), обладающего высокой прочностью и термостойкостью, сохраняющего свои очень хорошие электроизоляционные и диэлектрические свойства в диапазоне температур от -50 до +170°C.

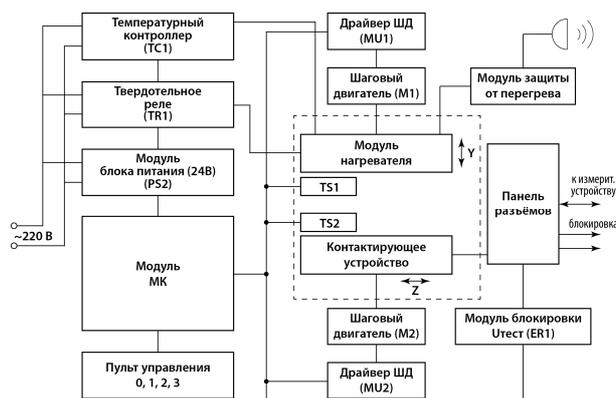


Рис. 1. Функциональная схема установки

В панели фрезерованием сделаны карманы для установки полупроводниковых приборов. Электрический и тепловой контакт приборов осуществляется прижимом термоплиты (модуль нагревателя) через электроизоляционную теплопроводящую панель. Прижим термоплиты с контактирующим устройством регулируется кнопками 1, 2, 3, расположенными на передней панели установки. Пружинные игольчатые контакты укреплены пайкой на печатной плате закреплённой на панели КУ.

Система управления установкой основана на 8-битном микроконтроллере ATmega8 и представлена модулем микроконтроллера. Управляющая программа для микроконтроллера разрабатывалась с помощью интегрированной платформы разработки (IDP) для проектирования и отладки приложений на базе микроконтроллеров Atmel ARM[®] Cortex[™]-M и AVR[®] - Atmel Studio 6.2. Исходный код программы написан на языке программирования C++.

Модуль микроконтроллера содержит цепь кварцевой стабилизации тактовой частоты, микро-

Кондусов Виктор Васильевич – ООО «Импри», главный инженер, тел. +7 920 451-07-70, kondusov_vv@mail.ru
 Кондусов Василий Ананьевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, тел. +7 920 451-07-70, kva.vrn@mail.ru

схемный стабилизатор напряжения +5В, модули драйверов шаговых двигателей М1 и М2, разъём внутрисхемного программирования.

Панель управления установкой соединена с модулем микроконтроллера, выведена на лицевую часть установки и содержит кнопочные переключатели:

«0» - установка контактирующего устройства в исходное положение для загрузки исследуемых полупроводниковых приборов, остановка и возврат в исходное положение контактирующего устройства, «1», «2», «3» - функция «Работа» с различными усилиями прижима исследуемых полупроводниковых приборов в контактирующем устройстве, соответственно: «1» - минимальное усилие прижима, «3» - максимальное усилие прижима. Внешний вид передней панели установки представлен на рис. 2



Рис. 2. Передняя панель установки

Для задания и точного поддержания температуры рабочей зоны использовался ПИД контроллер температуры ТСН4S производства компании Autonics. Для измерения температуры модуля нагревателя (нагревательной плиты) использовался преобразователь термоэлектрический типа ХА (К), входящий в состав контроллера температуры. Для нагрева и поддержания заданной температуры совместно с контроллером температуры использовалось твёрдотельное реле.

Модуль блока питания 24В использовался в качестве источника питания шаговых двигателей М1 и М2, подключаемых через драйвера, управляемые микроконтроллером а также для получения стабильного напряжения +5В, необходимого для питания модуля микроконтроллера..

Модуль нагревателя и контактирующее устройство приводились в движение с помощью винтовых передач шаговыми двигателями М1 и М2 соответственно, с точностью позиционирования 27 мкм.

Общий вид и задняя панель установки представлены на рис. 3.

Проектирование шасси, кинематических взаимосвязей и инженерные расчеты осуществлялось в системе Solidworks (Солидворкс) — программном комплексе САПР, обеспечивающем разработку изделий любой степени сложности и назначения.



Рис. 3. Общий вид и задняя панель установки

Для исследования температурных характеристик рабочей зоны установки использовалось пять термоэлектрических преобразователей ТСП 9703 (платиновые), представляющих собой гибкое основание с закреплённым на нём чувствительным элементом, установленные по периметру рабочей зоны и один в центре. Термопреобразователи подключались к многоканальному прецизионному измерителю температуры МИТ-8 с функцией самописца с выходом на ПК. По результатам исследований температурных характеристик выявлены данные указанные в табл. 1.

Таблица 1

Температурные характеристики

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Знач.
1.	Время выхода на температурный режим 100°C	мин	5
2.	Время стабилизации температурного режима	мин	2
3.	Максимальное отклонение температуры в рабочей зоне от заданного значения, при $T_{раб} \leq 100^{\circ}C$	°C	±0,5
4.	Максимальное отклонение температуры в рабочей зоне от заданного значения, при $T_{раб} > 100^{\circ}C$	°C	±0,7
5.	Градиент распределения температуры рабочей зоны	°C	0,5

Полученные данные указывают на оптимальный выбор материалов и конструкции рабочей зоны. Температурные характеристики рабочей зоны в несколько раз превосходят требования, предъявляемые к установкам такого типа.

При исследовании температурных характеристик рабочей зоны установки использовались следующие настройки температурного контроллера: диапазон пропорционального регулирования (P) - 5.7, интегральная составляющая (I) -100, дифференциальная составляющая (D) - 20, корректировка входа (IN-B) - 2,0.

В табл. 2 представлены технические характеристики разработанной установки.

Таблица 2

Основные технические характеристики

№	Характеристика	Ед. изм.	Значение
Общие характеристики			
1	Напряжение питания	В	220 ± 10%
2	Частота питающей сети	Гц	50 ± 0,4
3	Потребляемая мощность, не более	Вт	700
4	Температура эксплуатации	°С	от +10 до +35
5	Размеры (ШхДхВ)	мм	270x410x36 0
6	Масса, нетто	кг	32,5
Характеристики рабочей зоны			
7	Габариты рабочей зоны (ШхДхВ)	мм	170x120x5
8	Диапазон рабочих температур	°С	50-150
9	Время выхода на температурный режим, не более	мин	10

Продолжение табл. 2

10	Время стабилизации температурного режима, не более	мин	7
11	Максимальное отклонение температуры в рабочей зоне от заданного значения, при $T_{\text{раб.}} \leq 100^{\circ}\text{C}$	°С	± 0,7
12	Максимальное отклонение температуры в рабочей зоне от заданного значения, при $T_{\text{раб.}} > 100^{\circ}\text{C}$	°С	± 1
13	Градиент распределения температуры рабочей зоны, не более	°С	0,7
14	Точность задания температуры	°С	1

Литература

1. Аронов, В. Л. Испытание и исследование полупроводниковых приборов: учеб. пособие для специальностей полупроводниковой техники вузов / В.Л. Аронов, Я.А. Федотов. -М.: Высш. Шк., 1975. - 325 с.

ООО «Импри», г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

**AUTOMATED INSTALLATION TO DEFINE THERMAL REGIMES IN THE EXERCISE
OF THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR DEVICES**

V.V. Kondusov, chief engineer, LLC «Impri», Voronezh, Russian Federation, e-mail: kondusov_vv@mail.ru

V.A. Kondusov, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kva.vrn@mail.ru

The article describes the features, characteristics, and applied methodologies and tools to develop an automated setup used to define thermal regimes in thermoelectric tre-mirovka semiconductor devices. Presented installation is an integral part of software-hardware complex for training of the thermoelectric semiconductor devices in packages of the type KT-99-1 and 4601.3-1. In article the description of the functional diagram of the installation described, the control system is based on a microcontroller, and process of solid modeling of the hull and kinematic mounting systems using the SolidWorks system. The description of the thermal-control subsystem is based on PID temperature controller TCN4S and used to set and maintain precise temperature operating area. Described the process of research of the temperature characteristics of the working zone of the installation with the use of flexible thermoelectric transducers TSP 9703 connected to multi-channel precision temperature meter MIT-8 with the function of the recorder with the PC. The results of studies of the temperature characteristics data indicating the optimal choice of materials and design of the working area. The description of the primary node installation – contact device, provided with a spring-loaded needle contacts the panel which is made of amorphous material with very high strength and stiffness of polyetherimide (PEI)

Key words: adjuster regimes, temperature PID controller, SolidWorks, contacting device

References

1. Aronov V. L., Fedotov Ja. A. Ispytanie i issledovanie poluprovodnikovyyh priborov [Testing and research of semiconductor devices], Uchebnoe posobie dlja special'nostej poluprovodnikovoj tehniky vuzov, M., «Vysshaja shkola», 1975. - 325s.

ОЦЕНКА ТРЕБУЕМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ УГЛЕРОДИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В АЭРОЗОЛЬНОМ ОБРАЗОВАНИИ ПРИ ПРЕРЫВАНИИ РАДИОЛИНИИ УПРАВЛЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

М.Г. Калашников, С.В. Утемов, В.Г. Керков

Радиолинии управления (РЛУ) образуют особый класс радиотехнических систем передачи информации. Если в системах радиосвязи решается задача доставки получателю информации с минимальными искажениями, то в РЛУ передается команда на выполнение объектом управления определенных операций и решается задача обнаружения сигнала, при этом допускаются значительные его искажения. Радиолинии управления обладают рядом особенностей, в частности, в них используется статистический критерий Неймана-Пирсона, в соответствии с которым вначале обеспечивается заданная вероятность ложного приёма команды (ложного срабатывания исполнительного прибора), а затем принимаются все меры для получения максимальной вероятности правильного приёма команды.

Наличие аэрозольного образования (АО) на радиолинии управления ракетой может привести к искажениям полезного сигнала, его ослаблению и прерыванию. Эффективность маскирующих аэрозольных помех радиолинии управления существенно зависит от характеристик ослабления радиосигналов управления в миллиметровом диапазоне волн (ММДВ). Ранее разработана методика обоснования требований к коэффициенту ослабления аэрозольного образования для прерывания радиолинии управления в ММДВ. Однако практическая реализация аэрозольных помех, приводящих к прерыванию сигналов управления в ММДВ, ранее не рассматривалась. Одним из путей создания таких помех является применение углеродисто-волокнистых материалов (УВМ).

В связи с этим поставленная в статье задача обоснования требований к концентрации УВМ вдоль радиолинии управления, обеспечивающих прерывание сигнала управления в РЛУ, является важной и актуальной.

При решении этой задачи получены зависимости коэффициента ослабления сигнала управления в РЛУ на полуволновых вибраторах из углеродисто-волокнистых материалов от их концентрации в аэрозольном образовании. Установлено, что для прерывания сигналов управления целесообразно осуществлять постановку аэрозольного образования, в котором концентрация УВМ вдоль РЛУ составляет величину порядка $(2...3,7) \times 10^2 \text{ 1/м}^3$. Это позволит обеспечить выполнение требований к аэрозольным помехам на основе углеродисто-волокнистых материалов по эффективности прерывания сигналов радиолинии управления

Ключевые слова: аэрозольное образование, концентрация углеродисто-волокнистых материалов

Радиолинии управления (РЛУ), работающие в миллиметровом диапазоне волн (ММДВ), нашли широкое распространение в современном поколении противотанковых ракет с неавтономными системами телеуправления, типовыми представителями которого являются противотанковые ракеты TOW-2N, -2A RF, -2B Aero RF, -Bunker Buster RF, Red Arrow [1-4].

Одним из важнейших способов борьбы с такими системами телеуправления является применение аэрозольных образований (АО) из углеродисто-волокнистых материалов (УВМ). Создание аэрозольного образования на линии радиоуправления ракетой обеспечивает ослабление и (или) прерывание радиосигналов управления ракетой в процессе ее наведения на цель [5].

Для оценки ослабляющих характеристик АО из УВМ необходимо знание параметров такого аэрозольного образования – коэффициентов излучения $\alpha_{\text{УВМ}}$, отражения $\rho_{\text{УВМ}}$ и пропускания $\tau_{\text{ПР УВМ}}$. Заметим, что коэффициент излучения любого вещества связан с его коэффициентом поглощения прямо пропорциональной зависимостью. Если пренебречь возможностью отражения излучения РЛУ каждым

отдельным элементом АО из УВМ от его поверхности обратно внутрь элемента, то можно считать, что значение коэффициента излучения аэрозольного образования численно равно значению его коэффициента поглощения. Последнее, в свою очередь, определяется ослабляющими свойствами АО из УВМ, которые можно оценить на основе результатов [6].

В [7] приведена методика обоснования требований к коэффициенту ослабления аэрозольного образования для прерывания радиолинии управления в ММДВ.

Целью статьи является обоснование требований к концентрации УВМ вдоль радиолинии управления (требуемому количеству эффективно действующих полуволновых вибраторов из УВМ в аэрозольном образовании), обеспечивающих прерывание сигнала управления ракетой в РЛУ, работающей в ММДВ.

Используя результаты [6] можно показать, что коэффициент ослабления АО из УВМ определяется из выражения

$$\beta_{\text{осл}} = \exp[-S_{\text{эф.осл}} \int_{-\infty}^{\infty} W(x, y, z) dz], \quad (1)$$

где $S_{\text{эф.осл}}$ – максимальное значение эффективной поверхности ослабления (ЭПО) АО из УВМ на трассе распространения сигналов РЛУ ракетой; $W(x, y, z)$ – трехмерная плотность распределения полуволновых вибраторов из УВМ в аэрозольном образовании (в системе координат, связанной с цен-

Калашников Михаил Григорьевич – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8-910-348-05-90
 Утемов Сергей Владимирович – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8(473) 220-92-36
 Керков Владимир Георгиевич – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8-980-556-19-71

тром АО, причем ось Z направлена вдоль оси диаграммы направленности антенны подавляемой РЛУ ракетой).

В общем случае полуволновые вибраторы из УВМ наряду с поглощающими свойствами обладают и свойствами рассеяния. При этом результирующая поверхность ослабления $S_{\text{эф.осл.}}$ определяется суммой эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) $S_{\text{эф.рас.}}$ и эффективной поверхности поглощения (ЭПП) $S_{\text{эф.погл.}}$, то есть

$$S_{\text{эф.осл.}} = (S_{\text{эф.рас.}} + S_{\text{эф.погл.}}) = 0,17\lambda^2 N_d \quad (2)$$

где λ – рабочая длина волны полуволновых вибраторов из УВМ; $N_d = N \cdot K_d$ количество эффективно действующих полуволновых вибраторов из УВМ в АО; N – общее количество полуволновых вибраторов из УВМ в АО; $K_d = (0,2 \dots 0,4)$ – коэффициент действующего числа полуволновых вибраторов из УВМ.

Из анализа выражения (1) видно, что коэффициент ослабления АО из УВМ $\beta_{\text{осл}}$ изменяется от 1, когда излучение РЛУ проходит через аэрозольное образование без ослабления, до 0, когда излучение РЛУ полностью ослабляется в АО. Таким образом, параметр $\beta_{\text{осл}}$ по существу является коэффициентом пропускания аэрозольного образования из УВМ.

В случае, если АО из УВМ обладает только поглощающими свойствами, $S_{\text{эф.осл.}} = S_{\text{эф.погл.}}$ и $\beta_{\text{осл}} = \tau_{\text{пр.УВМ}} = 1 - \tau_{\text{погл.УВМ}}$.

Для аэрозольного образования из УВМ, обладающего наряду с поглощающими свойствами также и свойствами рассеяния, помимо определения коэффициентов $\alpha_{\text{УВМ}} = \tau_{\text{погл.УВМ}}$ и $\tau_{\text{пр.УВМ}}$ необходимо знание и коэффициента отражения (рассеяния) АО из УВМ - $\rho_{\text{УВМ}}$. Оценка этого параметра может быть проведена по результатам определения параметров $\tau_{\text{пр.УВМ}}$ и $\tau_{\text{погл.УВМ}}$ согласно формуле:

$$\rho_{\text{УВМ}} = 1 - \tau_{\text{погл.УВМ}} - \tau_{\text{пр.УВМ}} \quad (3)$$

На основе формул (2, 3) можно определить выражения для коэффициентов $\tau_{\text{погл.УВМ}}$, $\rho_{\text{УВМ}}$, и $\tau_{\text{пр.УВМ}}$ применительно к конкретным моделям аэрозольного образования из УВМ. На практике при создании пассивных помех РЛУ возможно формирование АО в виде завесы или локального образования. Применительно к этим моделям выражения для определения коэффициентов $\tau_{\text{погл.УВМ}}$, $\rho_{\text{УВМ}}$, и $\tau_{\text{пр.УВМ}}$ можно представить в следующем виде:

$$\tau_{\text{погл.УВМ}i} = \alpha_{\text{УВМ}i} = 1 - \exp\left(-\frac{S_{\text{эф.погл.}}}{S_i} v_i\right), \quad (4)$$

$$\rho_{\text{УВМ}i} = \exp\left(-\frac{S_{\text{эф.рас.}}}{S_i} v_i\right), \quad (5)$$

$$\tau_{\text{пр.УВМ}i} = \beta_{\text{осл}} = \exp\left(-\frac{S_{\text{эф.осл.}}}{S_i} v_i\right), \quad (6)$$

$$v_i = \exp\left[-\frac{\delta_0^2(i-1)}{2\sigma^2}\right]; i = 1, 2; 0 \leq \delta_0 \leq 3\sigma,$$

где S_i – площадь поперечного (по отношению к направлению полета средства ВТО) сечения АО из УВМ (S_1 – площадь завесы из полуволновых вибраторов из УВМ, $S_2 = 2\pi\sigma^2$ – площадь локального аэрозольного образования полуволновых вибраторов из УВМ); σ – среднеквадратическое рассеяние излучения на трассе распространения радиосигналов управления ракетой в локальном АО из УВМ, δ_0 – параметр закона распределения УВМ в АО.

Здесь индекс $i=1$ относится к завесе с равномерным распределением в ней полуволновых вибраторов из УВМ, а индекс $i=2$ – к локальному образованию с нормальным распределением в нем полуволновых вибраторов из УВМ.

Для эффективного прерывания сигналов РЛУ ракетой при заданных значениях S_i , $\tau_{\text{погл.УВМ}}$, $\rho_{\text{УВМ}}$, и $\tau_{\text{пр.УВМ}}$ из выражений (2), (4)–(6) можно получить требуемое значение $S_{\text{эф.осл.}}$, а из выражения (1) – требуемую для прерывания радиосигналов управления ракетой концентрацию УВМ вдоль РЛУ.

В [7] показано, что для прерывания сигналов телеуправления ракетой в ММДВ требуемое значение коэффициента ослабления АО должно составлять величину порядка $2,5 \times 10^{-2}$ (на дальности полета ракеты, не превышающей 2 км), и величину порядка 10^{-1} – на дальности 4 км. Соответствующая этим величинам коэффициент ослабления АО требуемая для прерывания радиосигналов управления ракетой концентрация УВМ вдоль РЛУ, рассчитанная с помощью приведенных зависимостей (1-6), составит: на длине волны $\lambda = 3,2$ мм величину $(1 \dots 2,2) \times 10^2$ 1/м³, а на длине волны $\lambda = 8,6$ мм – $(2 \dots 3,7) \times 10^2$ 1/м³.

Таким образом, для прерывания сигналов управления ракетой в трёх и восьми миллиметровом диапазонах длин волн целесообразно осуществлять постановку АО, в котором концентрация УВМ вдоль РЛУ составляет величину не менее $(2 \dots 3,7) \times 10^2$ 1/м³. Это позволит обеспечить выполнение требований к АО из УВМ по эффективности прерывания сигналов управления ВТО.

Литература

1. Авиационные системы радиоуправления. Т.3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения [Текст] / под ред. А.И. Канашенкова и В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
2. Высокоточное оружие зарубежных стран. Т.1. Противотанковые ракетные комплексы [Текст] // Обзорно-аналитический справочник. – Тула: ООО «Издательская группа «Бедретдинов и Ко», 2008. – 564 с.
3. Начало производства беспроводных ПТУР TOW [Текст] // Сборник научно-технической информации. – Тула, КБП, 2008. – № 1(23). – С. 63-66.
4. Противотанковые системы «РЭД ЭРРОУ» [Текст] // Военно-техническое сотрудничество. – 2002. – № 32. – С. 56-58.
5. Алимин, Б.Ф. Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов [Текст] / Б.Ф. Алимин // Зарубежная радиоэлектроника. – 1989. – № 2. – С. 75-82.
6. S. Kownacki. Serecning Effect of a Chaff cloud // Transaction on aerospace and electronic Systems. – 1967. – V. AES-3. – № 4. – P. 23-26.
7. Калашников, М.Г. Методика обоснования требований к коэффициенту ослабления аэрозольного образования для прерывания радиолонии управления в миллиметровом диапазоне волн [Текст] / М.Г. Калашников, С.В. Утемов, В.Г. Керков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. – № 5. – С. 72-74.

ESTIMATE OF DEMANDED CONCENTRATION OF UGLERODISTO-FIBROUS MATERIALS IN AEROSOL FORMATION AT INTERRUPTION OF RADIO-FREQUENCY SPECTRAL LINE OF GUIDANCE IN MILLIMETRIC WAVE RANGE

M.G. Kalashnikov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation, PhD +7-910-348-05-90

S.V. Utyomov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation, PhD +7-951-853-07-00

V.G. Kerkov – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation, PhD +7-980-556-19-71

Radio link control (RLC) form a special class of radio communication systems. If the radio systems solve the problem of delivery to the recipient information with minimal distortion in the RLC is transferred to the command object to perform certain operations, control and solve the problem of signal detection, while it allowed a significant distortion. radio control have a number of features, in particular, they use statistical Neyman-Pearson criterion, according to which the first is provided by a given probability of false reception team (false alarm executive device), and then take all measures to maximize the probability of correct reception of the team.

The presence of aerosol formation on the radio link control can lead to distortion of the desired signal, and a weakening of its termination. The efficacy of aerosol masking noise missile control radio depends essentially on the characteristics of the attenuation control of radio waves in the millimeter range. Earlier, the technique of substantiation requirements for the attenuation of aerosol formation for radio control interruption in the millimeter range. However, the practical implementation of airborne noise leading to an interruption of the control signals in the millimeter range not previously considered. One way of creating such interference is the use of carbon-fiber materials (CFM).

In connection with this problem posed in the article to substantiate claims CFM concentration along the radio control, provide management interrupt signal RLC is an important and urgent.

In solving this problem are obtained depending on the attenuation control signal to the RLC at half-wave dipoles made of carbon-fiber materials by their concentration in the aerosol formation. It was found that for the interrupt control signals it is advisable to carry out the formation of an aerosol formulation in which the concentration of CFM along the RLC is of the order $(2...3,7) \times 10^2 \cdot 1/m^3$. This will ensure compliance with the requirements for aerosol interference on the basis of carbon-fiber materials on the effectiveness of the radio signals interrupt management

Key words: aerosol formation, concentration of carbon-fiber materials

References

1. Aviacionnie T. 3. Systemi komandnogo radioupravleniya. Avtonomnie i kombinirovannye systemi navedeniya [Aviation radio system. Vol. 3. Command radio control. Autonomous and combined guidance system] / Pod red. A.I. Kanaschenkova i V.I. Merkulova – M.: Radiotekhnika, 2004. – 320 s.
2. Visokotochnoe oruzhie zarubezhnih stran. T. 1. Protivotankovie raketnie kompleksi [Precision-guided weapons to foreign countries. Vol. 1. Anti-missile systems] / Obzorno-analiticheskii spravochnik. – Tula: OOO «Izdatelskaya gruppa «Bedretdinov i Ko», 2008. – 564 s.
3. Nachalo proizvodstva besprovodnih PTUR TOW [Start of production of the wireless TOW ATGM] // Sbornik nauchno-technicheskoi informacii. – Tula, KBP, 2008. – №1(23). – S. 63-66.
4. Protivotankovie systemi «Rad Arrow» [Anti-system "RED ARROW"] / Voenno-technicheskoe sotrudnichestvo. – 2002 – №32. – S. 56-58.
5. Alimin B.F. Sovremennye razrabotki poglotitelei elektromagnitnih voln i radiopoglgshchayuschih materialov [Modern developments absorb statistics of electromagnetic waves and radar absorbing materials] / B.F. Alimin // Zarubezhnaya radioelektronika. – 1989. – №2. – S. 75-82.
6. S. Kownacki. Searching Effect of a Chaff cloud // Transaction on aerospace Systems. – 1967. – V. AES-3. – №4. – P. 23-26.
7. Kalashnikov M.G., Utyomov S.V., Kerkov V.G. Metodika obosnovaniya trebovaniy k koefficientu oslableniya aeroroznogo obrazovaniya dlya prerivaniya radiolinii upravleniya v millimetrovom diapazone voln [Methodology of justification of requirements to the attenuation coefficient of the aerosol formation to interrupt the radio link management in Milli-meter wavelengths] / M.G. Kalashnikov, S.V. Utyomov, V.G. Kerkov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta. – 2015. – T.11. – №5. – S. 72-74.

ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЗОТИРОВАННОГО ТИТАНА

В.В. Пешков, А.Б. Коломенский, А.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин

Эффективным средством, обеспечивающим повышение сопротивления титановых сплавов высокотемпературной деформации в условиях ползучести, является их азотирование. Однако образующиеся на поверхности титана охрупченные нитридные и газонасыщенные слои приводят к снижению долговечности при испытаниях на циклическую усталость на 30–40 %.

В данной статье описано восстановление усталостных характеристик титановых изделий с газонасыщенными слоями путем растворения оксидного слоя в процессе вакуумного отжига и путем химического травливания поверхностных слоев.

Исследования проводили на полированных образцах размером $2 \times 5 \times 10$ мм из листового сплава ВТ6, которые азотировали при 800–950 °С в течение 5–60 мин в среде газовой смеси Ar (99 %) и N_2 (1,0 %) при атмосферном давлении. В качестве характеристики состояния поверхности титана использовали глубину охрупченного слоя и величину микротвердости поверхности. Испытания образцов на повторно–статическое растяжение проводили на машине УММ–10 с частотой 0,7–0,8 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R=+0,1$ при $\sigma_{max} = 680$ Мпа.

Восстановительный отжиг проводился в среде аргона. Установлен диапазон изменения параметров отжига, обеспечивающего очистку поверхности образцов от охрупченной части газонасыщенного слоя. Например, для слоя толщиной от 4 до 20 мкм, требуемое время отжига при 950 °С составляет от 1 до 30 часов.

Для регламентированного съема поверхностного слоя на различную глубину образцы подвергали травлению в смеси азотной и плавиковой кислот со скоростью съема металла до 1 мкм/мин. Для восстановления циклической выносливости до уровня основного материала достаточно удалить поверхностный слой толщиной приблизительно в 2,2 толщины газонасыщенного слоя, а для достижения уровня повторно–статической выносливости, превышающего уровень выносливости основного металла на (15–20) %, необходимо удалить слой толщиной приблизительно в 3 толщины газонасыщенного слоя

Ключевые слова: титановые сплавы, охрупчивание, циклическая выносливость, отжиг, химическое травление

В работе [1] было показано, что эффективным средством, обеспечивающим повышение сопротивления сплава ВТ6 высокотемпературной деформации в условиях ползучести, является его азотирование. Однако, образующиеся на поверхности титана охрупченные нитридные и газонасыщенные слои глубиной до 30–35 мкм, приводят к снижению долговечности при испытаниях на циклическую усталость на 30–40 %, а при испытаниях в малоцикловой области на повторно–статическую выносливость – более чем в 10 раз [2].

О попытках восстановления усталостных характеристик титановых изделий с газонасыщенными слоями путем растворения оксидного слоя в процессе вакуумного отжига, приводящего к перераспределению кислорода по объему поверхностного слоя, сообщается в работе [3].

Исследование возможности восстановления усталостной прочности титана за счет механического съема (полированием) альфированного слоя показало, что удаление всего поверхностного слоя

восстанавливает усталостную прочность до первоначального значения, если температура окисления не превышала 800 °С [4].

В работах [5, 6 и др.] на основании систематических исследований влияния газонасыщенного слоя на служебные характеристики титановых сплавов установлен эффект, заключающийся в повышении циклической долговечности при неполном съеме газонасыщенного слоя.

Следует отметить, что закономерности влияния газонасыщения при нагреве в воздухе или в вакууме на служебные характеристики титана и его сплавов, описанные в литературе, очевидно, не могут быть в полной мере перенесены на титановые конструкции, получаемые высокотемпературной обработкой с использованием азота или газовой смеси аргона с азотом. Поэтому целью данной работы было установление влияния отжига и химического травливания поверхностных слоев предварительно азотированного сплава ВТ6 на его повторно–статическую выносливость.

Повышение циклической выносливости азотированного сплава ВТ6 восстановительным отжигом

Понизить концентрацию азота (как и кислорода) в поверхностном слое можно отжигом в инертной среде, при котором будет происходить перераспределение примесей, снижающих пластичность поверхностного слоя титана.

Перераспределение азота при отжиге титана будет происходить в результате развития его диффузии в металлическую основу, поэтому первая

Пешков Владимир Владимирович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: otsp@vorstu.ru
Коломенский Александр Борисович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: otsp@vorstu.ru
Пешков Алексей Владимирович - ВНИИС, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: otsp@vorstu.ru
Булков Алексей Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: bulkov_ab@mail.ru
Корчагин Илья Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: korchagin_ib@mail.ru

часть данной работы состояла в решении задачи определения технологических параметров отжига – температуры t_0 и времени τ_0 , обеспечивающих восстановление пластичности и, как следствие этого, выносливости азотированного титана.

Исследования проводим на образцах размером $2 \times 5 \times 10$ мм из листового сплава ВТ6, которые после полирования и обезжиривания азотировали при 800°C в течение 60 мин в среде газовой смеси Ar (99 %) и N_2 (1,0 %) при атмосферном давлении. В качестве характеристики состояния поверхности титана использовали глубину охрупченного слоя, которую определяли по методике [7] и величину микротвердости поверхности, замеренную при нагрузке на индентор 0,2 Н.

В результате азотирования на поверхности образцов формировался охрупченный слой глубиной ~ 4 мкм. Микротвердость при этом составляла 9–10 ГПа. Затем образцы отжигали в среде аргона высшего сорта, дополнительно очищенного путем его пропускания через титановую стружку, нагретую до 900°C . После отжига образцы деформировали изгибающим усилием до разрушения и в зоне наибольшей деформации с поверхности снимали фрактограммы, по которым судили о ее состоянии.

Результаты экспериментов показали, что при данной температуре t по мере увеличения длительности отжига τ состояние деформированной поверхности изменяется в последовательности: исходное состояние – регулярное растрескивание (рис. 1, а) – нерегулярное растрескивание (рис. 1, б–г) – образование субструктурного рельефа без растрескивания поверхности (рис. 1, д, е).

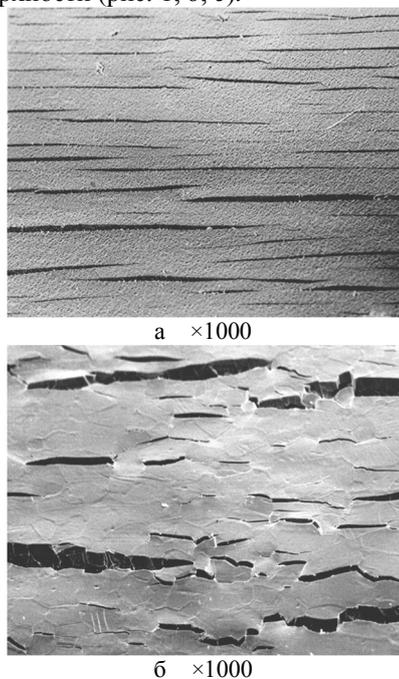
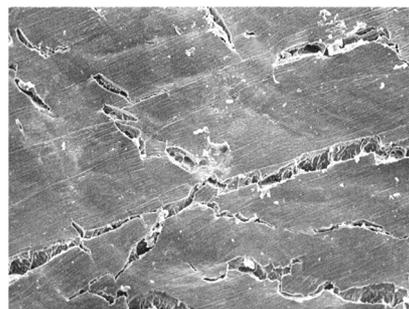


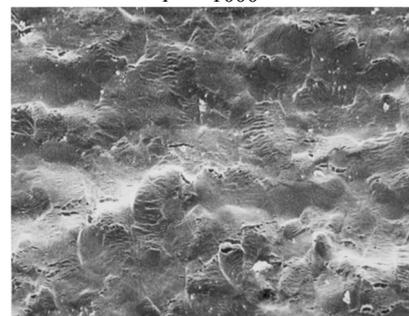
Рис. 1. Влияние увеличения времени отжига ($a \rightarrow b \rightarrow \text{в} \rightarrow \text{г} \rightarrow d, e$) на характер растрескивания поверхности азотированного сплава ВТ6 при деформации изгибом



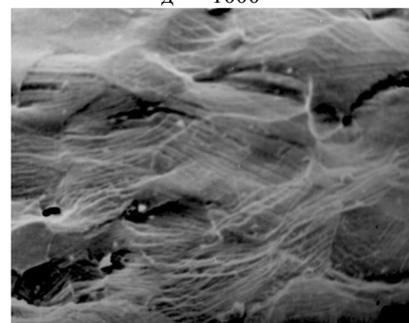
в $\times 1000$



г $\times 1000$



д $\times 1000$



е $\times 5000$

Рис. 1. Влияние увеличения времени отжига ($a \rightarrow b \rightarrow \text{в} \rightarrow \text{г} \rightarrow d, e$) на характер растрескивания поверхности азотированного сплава ВТ6 при деформации изгибом (продолжение)

Способность азотированного металла после отжига в среде аргона деформироваться без растрескивания поверхности можно считать признаком восстановления пластических свойств поверхности и ее «очистки» от охрупченных слоев. Кривую $\tau_0 = \varphi(t_0)$ (рис. 2) проводили по границе между темными кружками (соответствующими образованию субструктурного рельефа без растрескивания) и наполовину зачерненными (соответствующими нерегулярному растрескиванию).

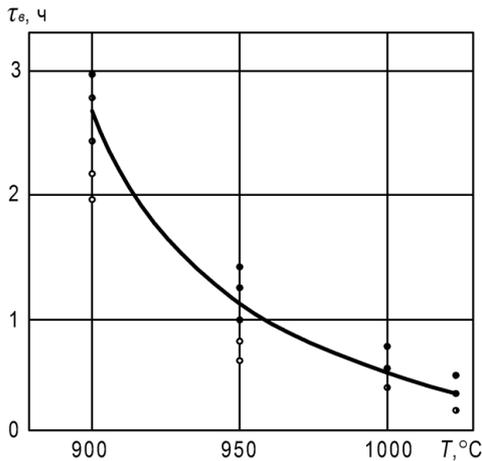


Рис. 2. Зависимость времени $\tau_{\text{в}}$, необходимого для восстановления пластичности (способности деформироваться) поверхности азотированного сплава ВТ6 от температуры отжига: ○ – регулярное растрескивание поверхности; ● – образование субструктурного рельефа

Из этих данных следует, что при «удалении» охрупченного слоя с поверхности титана за счет растворения азота в металлической основе, например, при 950 °С требуется время более 65 мин.

Измерение микротвердости поверхности образцов после восстановительного отжига показало, что она составляет 2,9–3,1 ГПа, т.е. значительно меньше микротвердости исходной азотированной поверхности (9–10 ГПа), и соизмерима с микротвердостью сплава ВТ6 в состоянии поставки (2,95 ГПа).

Рассматривая растворение охрупченного слоя в металлической основе как результат процесса диффузии азота из плоского источника в глубину полубесконечного тела, зависимость концентрации азота как функции расстояния X и времени τ можно представить решением уравнения Фика [8]:

$$C_{(x,\tau)} = \frac{\alpha}{2\sqrt{\pi D \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right), \quad (1)$$

где α – величина, пропорциональная толщине охрупченного азотированием слоя; $D = D_0 \cdot \exp(E/RT)$ – коэффициент диффузии.

Из уравнения (1) следует, что время, необходимое для понижения концентрации азота на поверхности ($x=0$) до $C < C_{\text{кр}}$ и восстановления пластических свойств титана, должно экспоненциально зависеть от температуры, т.е. $\tau_{\text{в}} \sim \exp(E/RT)$, где E – энергия активации процесса, контролирующего понижение концентрации азота в охрупченном слое.

Построение экспериментально полученных данных в координатах $\ln \tau_{\text{в}} - 1/T$ (рис. 3) позволяет оценить эффективное значение энергии активации E , которое составляет 215 кДж/моль.

Из решения уравнения Фика при $x=0$ следует, что $\alpha = C \cdot 2\sqrt{\pi D \tau}$. Так как α пропорциональна толщине охрупченного слоя, то для определения времени $\tau_{\text{в}}$, необходимого для восстановления пластических свойств поверхности при наличии охрупченного слоя толщиной $\delta_{\text{охр}}$, можно использовать выражение

$$\tau_{\text{в}} = \delta_{\text{охр}}^2 / k_p, \quad (2)$$

где k_p – константа растворения охрупченного слоя, являющаяся функцией температуры.

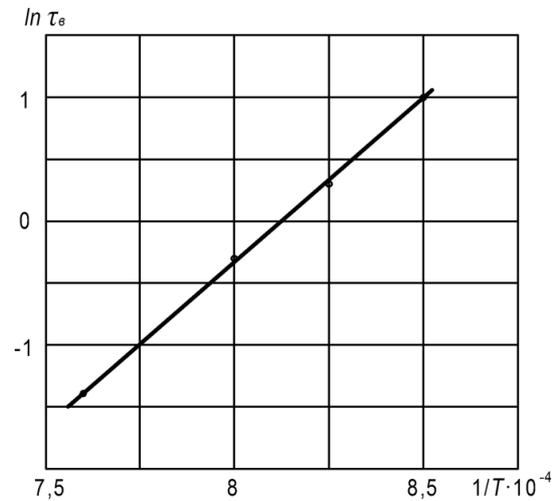


Рис. 3. Зависимость $\ln \tau_{\text{в}} - 1/T$

Используя экспериментальные данные (рис. 2) и уравнение (2), можно дать количественную оценку величины k_p для сплава ВТ6, которая составляет ($\text{мкм}^2/\text{с}$): для 900 °С – $1,6 \cdot 10^{-3}$; для 950 °С – $4 \cdot 10^{-3}$; для 1000 °С – $9,2 \cdot 10^{-3}$; для 1050 °С – $2 \cdot 10^{-2}$.

Найденные значения k_p могут быть аппроксимированы выражением:

$$k_p = 6,3 \cdot 10^6 \exp(-215000/RT). \quad (3)$$

Полученные результаты позволяют построить номограмму для оценки времени, необходимого для восстановления пластических свойств азотированной поверхности сплава ВТ6 за счет отжига в среде аргона при заданной температуре (рис. 4). Из этих данных следует, что с увеличением толщины охрупченного азотированием слоя время $\tau_{\text{в}}$, необходимое для восстановления его пластичности за счет растворения азота в металлической основе, резко возрастает.

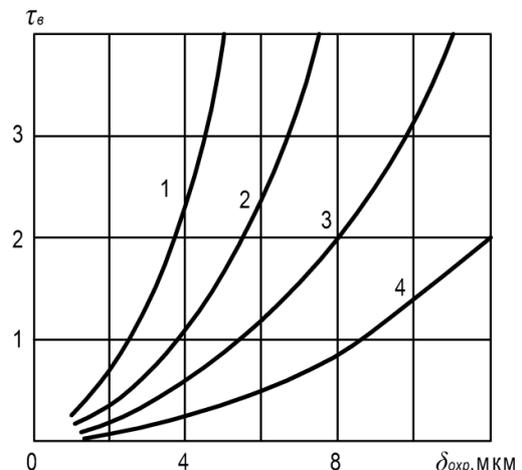


Рис. 4. Время $\tau_{\text{в}}$, необходимое для растворения охрупченного азотированием слоя толщиной $\delta_{\text{охр}}$ в сплаве ВТ6 при температурах, °С: 900–(1); 950–(2); 1000–(3) и 1050–(4)

Исследование влияния восстановительного отжига на выносливость сплава ВТ6 проводили повторно–статическими испытаниями на растяжение по методике [5]. Образцы предварительно азотировали в смеси аргона с азотом в течение 30 мин при температурах 800 °С и 900 °С, что приводило к образованию на их поверхности охрупченных слоев толщиной 3,9(±0,1) мкм и 7,8(±0,2) мкм. Микротвердость поверхности, замеренная при нагрузке на индентор 0,2 Н, составляла 9,0(±0,4) и 12,5(±0,7) ГПа соответственно. Затем образцы подвергали восстановительному отжигу при 950 °С в среде аргона. После отжига образцы испытывали на повторно–статическое растяжение на машине УММ–10 с частотой 0,7–0,8 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R=+0,1$ при $\sigma_{max}=0,8\sigma_s$, т.е. $\sigma_{max} = 680$ МПа.

Влияние длительности восстановительного отжига в среде аргона на количество циклов до разрушения $N=\varphi(\tau)$ приведены на рис. 5.

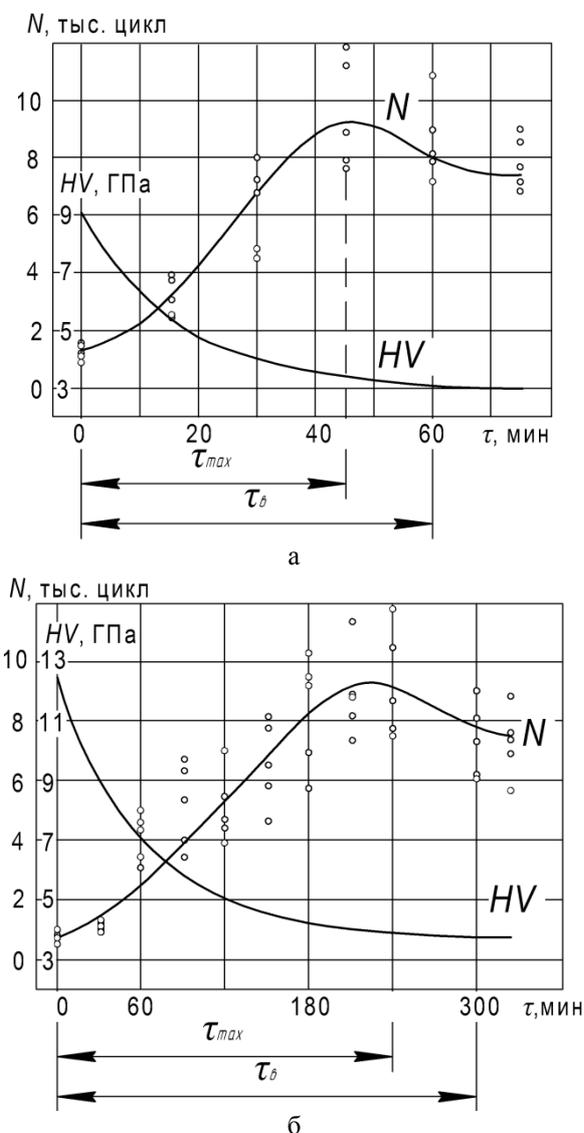


Рис. 5. Зависимость долговечности N и микротвердости HV поверхности образцов от длительности восстановительного отжига при 950 °С; предварительное азотирование в течение 30 мин при температурах, °С: а – 800 и б – 900

Из результатов испытаний следует, что увеличение длительности отжига сопровождается уменьшением микротвердости поверхности и ростом циклов N до разрушения. При этом зависимость $N=\varphi(\tau)$ имеет экстремальный характер. Повышение температуры предварительного азотирования образцов сопровождается ростом времени, необходимого для достижения максимального значения числа циклов до разрушения (см. рис. 5, а и б).

Сопоставление времени отжига τ_{max} , при котором достигается N_{max} на зависимостях $N=\varphi(\tau)$, со временем τ_s , необходимым для полного восстановления пластических свойств поверхности, показывает, что $\tau_{max} < \tau_s$, то есть полный восстановительный отжиг дает несколько меньшую долговечность, которая равна долговечности основного материала.

Следует отметить, что применение отжига в среде аргона для восстановления пластичности и долговечности при повторно–статических испытаниях может быть оправдано при образовании на поверхности охрупченных азотированием слоев относительно небольших толщин. Так, если для восстановления пластических свойств азотированной поверхности с толщиной охрупченного слоя $\delta_{охр}=4$ мкм требуется отжиг, например, при 950 °С в течение 1 часа, то при $\delta_{охр}=20$ мкм это время возрастет приблизительно до 30 часов.

Повышение циклической выносливости химическим травлением поверхностных слоев.

Исследования проводили на образцах, которые предварительно азотировали при 950 °С в течение 5 и 60 мин, что сопровождалось образованием на поверхности охрупченных слоев, равных 4(±0,1) мкм и 16,4(±0,4) мкм.

Для регламентированного съема поверхностного слоя на различную глубину образцы подвергали травлению в смеси HNO_3 (600–750 мл/л, плотность 1,4 г/см³) и HF (180–220 мл/л, плотность 1,13 г/см³). Скорость съема металла при этом составляла ~1 мкм/мин.

После каждого травления измерялась толщина образца, а затем для удаления продуктов химического травления поверхность подполировывалась, и производился замер микротвердости.

Подготовленные таким образом образцы испытывали на повторно–статическое растяжение по вышеприведенной методике.

Результаты циклических испытаний и замера микротвердости приведены на рис. 6.

Из этих данных видно, что с увеличением глубины съема азотированного слоя микротвердость поверхности падает, а количество циклов до разрушения растет. При этом обнаруживается закономерность, заключающаяся в том, что полный съем диффузионного слоя обеспечивает меньшую долговечность, чем неполный. Полученные результаты качественно согласуются с данными работы [6], полученными для газонасыщенных слоев, обогащенных кислородом. Эффект повышения долговечности, как и в случае использования восстановительного отжига, обусловлен, вероятно, получением некоторого

оптимального значения концентрации примесей внедрения (в нашем случае азота) в поверхностном слое, что приводит к росту сжимающих напряжений в поверхностном слое и, как следствие этого, увеличению времени, необходимого для зарождения критической микротрещины.

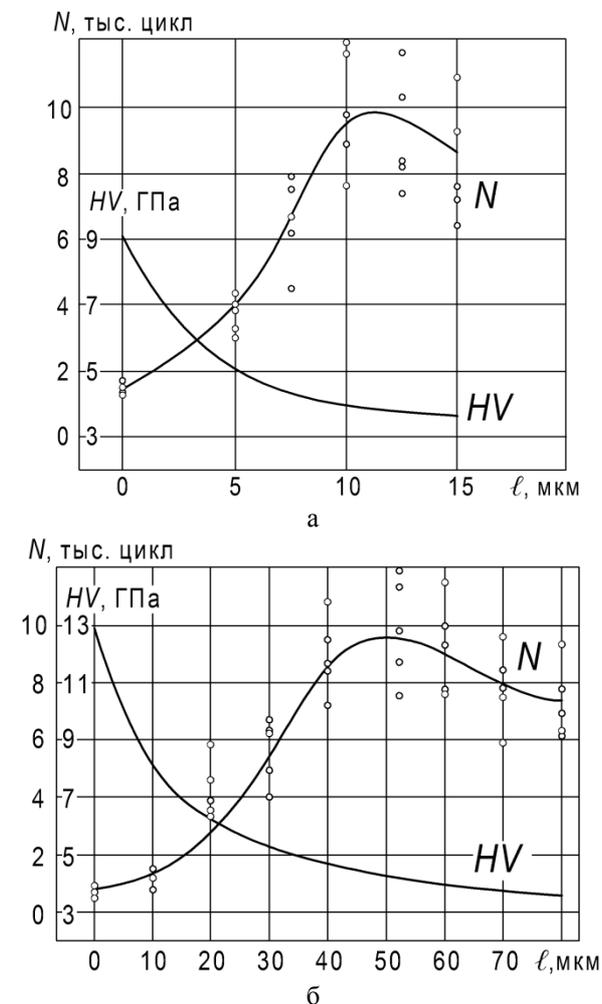


Рис. 6. Зависимость долговечности N и микротвердости HV поверхности образцов из сплава ВТ6 от глубины съема азотированного слоя, сформировавшегося в процессе отжига при $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение, мин: а – 5; б – 60

Из сопоставления образующихся при азотировании глубины охрупченного слоя $\delta_{охр}$ (выявляемого по излому или растрескиванию поверхности) и диффузионного слоя (выявляемого по микротвердости), следует, что $\delta_{охр}$ составляет 23–25 % от величины всего диффузионного слоя. Для восстановления долговечности до уровня основного материала необходимо с поверхности азотированного сплава ВТ6 удалить слой толщиной $\delta = (2,1 \dots 2,3)\delta_{охр}$, а для достижения максимума повторно–статической выносливости, превышающего уровень выносливости основного материала на 15–20 %, необходимо удалить слой $\delta = (2,7 \dots 2,9)\delta_{охр}$.

Выводы

1. Циклическая выносливость азотированного листового сплава ВТ6 может быть повышена высокотемпературным отжигом в среде аргона или снятием (мерным химическим травлением) приповерхностной части азотированного слоя.

2. При анализе служебных свойств титана в качестве интегральной характеристики состояния поверхности целесообразно использовать глубину охрупченного слоя, образующегося в результате его взаимодействия с азотом.

3. Установлена количественная взаимосвязь между температурой и длительностью восстановительного отжига, обеспечивающего очистку поверхности образцов из сплава ВТ6 от охрупченной части газонасыщенного слоя, за счет растворения азота в металлической основе.

4. Для восстановления циклической выносливости азотированного сплава ВТ6 до уровня основного материала достаточно удалить поверхностный слой $\delta \geq (2,1-2,3)\delta_{охр}$, а для достижения уровня повторно–статической выносливости, превышающей уровень выносливости основного металла на (15–20) %, необходимо удалить слой $\delta = (2,7-2,9)\delta_{охр}$.

Литература

1. Пешков, В.В. Высокотемпературная ползучесть титана при испытаниях в азотсодержащих средах [Текст] / В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2016. – Т. 12, № 2. – С. 108–112.
2. Пешков, А.В. Азотирование и его влияние на свойства титанового сплава ВТ6 [Текст] / А.В. Пешков, В.Ф. Селиванов, В.Р. Петренко // Технология машиностроения. – 2006. – № 6. – С. 31–34.
3. Колачев, Б.А. Вакуумный отжиг титановых конструкций [Текст] / Б.А. Колачев, В.В. Садков, В.Д. Талаев. – М.: Машиностроение, 1991. – 224 с.
4. Солонина, О.П. Жаропрочные титановые сплавы [Текст] / О.П. Солонина, С.Г. Глазунов. М.: Металлургия, 1976. – 447 с.
5. Повторно – статическая выносливость листового сплава ОТ4 с не полностью удаленным поверхностным газонасыщенным слоем [Текст] / А.Б. Коломенский, Б.А. Колачев, А.Н. Рошупкин, А.В. Дегтярев // Физико – химическая механика материалов. – 1989. – № 5. – С. 112 – 114.
6. Влияние регламентированного съема травлением поверхностного газонасыщенного слоя на долговечность при малоциклового усталости листов из титана ВТ1–0 [Текст] / А.Б. Коломенский, Б.А. Колачев, А.В. Дегтярев, А.Н. Рошупкин // Технология лёгких сплавов. – 1990. – № 6. – С. 20 – 24.
7. Микроструктура, топография поверхности разрушения и свойства титановых сплавов и диффузионно–сварных соединений [Текст] / В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Л. Батаронов и др. – Воронеж: Издательско–полиграфический центр «Научная книга», 2014. – 216 с.
8. Шьюмон П. Диффузия в твёрдых телах [Текст] / П. Шьюмон. М.: Металлургия, 1966. – 195 с.

IMPROVING CYCLE LIFE OF THE NITRIDED TITANIUM

V.V. Peshkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: otsp@vorstu.ru

A.B. Kolomenskij, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: otsp@vorstu.ru

A.V. Peshkov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Russian Research Institute for Certification JSC, Moscow, Russian Federation, e-mail: otsp@vorstu.ru

A.B. Bulkov, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: bulkov_ab@mail.ru

I.B. Korchagin, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: korchagin_ib@mail.ru

An effective means of providing increasing resistance of titanium alloys high temperature deformation under creep conditions is their nitriding. However, formed on the surface of titanium nitride embrittlement and gas-saturated layers, lead to a decrease in durability when tested in cyclic fatigue by 30-40%.

This article describes the restoration of fatigue performance of titanium products from the gas-saturated layer by dissolving the oxide layer in the vacuum annealing, and by chemical etching-top-surface layers.

Studies were conducted on polished samples sized $2 \times 5 \times 10$ mm sheet of the alloy VT6 that azo-ted at 800-950 °C for 5-60 minutes in a medium of the gas mixture Ar (99%) and N₂ (1,0%) at atmospheric pressure. As an indication of the state of the surface of the titanium used embrittled layer depth and microhardness of the surface. Testing of the samples on re-static stretching performed on the machine UMM-10 with a frequency of 0.7-0.8 Hz and asymmetry coefficient cycles $R=+0,1$ at $\sigma_{\max}=680$ Mpa.

Recovery annealing was performed in an argon atmosphere. Established range of the annealing parameters, providing clean surface samples from the embrittled portion of gas-saturated layer. For example, for a layer thickness of 4 to 20 microns, the required annealing time at 950 °C is from 1 to 30 hours.

For the regulated removal of the surface layer to different depths samples were etched in a mixture of nitric and hydrofluoric acids to the metal removal rate of up to 1 m / min. To restore to the level of cyclic endurance is sufficient to remove the base material surface layer having a thickness of approximately 2.2 saturated layer thickness, and to achieve the level of re-static endurance, exceeding the level of the base metal endurance on the (15-20)%, it is necessary to remove the layer thickness about 3 gas-saturated layer thickness

Key words: titanium alloys, embrittlement, cyclic endurance, annealing, chemical etching

References

1. Peshkov V.V. Vysokotemperaturnaja polzuchest' titana pri ispytaniyah v azotosoderzhashhih sredah [High temperature creep test of titanium in the nitrogen-containing environments]/ V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, I.B. Korchagin // Vestnik VGTU. – 2016. – Vol. 12, № 2. – pp. 108–112.
2. Peshkov A.V. Azotirovanie i ego vlijanie na svoystva titanovogo splava VT6 [Nitriding and its influence on the properties of titanium alloy VT6]/ A.V. Peshkov, V.F. Selivanov, V.R. Petrenko // Tehnologija mashinostroenija. – 2006. – № 6. – pp. 31–34.
3. Kolachjov B.A. Vakuurnyj otzhig titanovykh konstrukcij [Vacuum annealed titanium structures]/ B.A. Kolachjov, V.V. Sadkov, V.D. Talalaev. M.: Mechanical engineering, 1991. - 224 p.
4. Solonina O.P. Zharoprochnye titanovyje splavy [Heat-resistant titanium alloys]/ O.P. Solonina, S.G. Glazunov. M.: Metallurgy, 1976. - 447 p.
5. Povtorno – staticheskaja vynoslivost' listovogo splava OT4 s ne polnost'ju udaljonnyh poverhnostnym gazonasysyhennym sloem [Re - static endurance of sheet alloy OT4 with incompletely remote gas-saturated surface layer]/ A.B. Kolomenskij, B.A. Kolachev, A.N. Roshhupkin, A.V. Degtjarev // Physical - chemical mechanics of materials. – 1989. – № 5. – pp. 112 – 114.
6. Vlijanie reglamentirovannogo sjoma travleniem poverhnostnogo gazonasysyhennogo sloja na dolgovechnost' pri malociklovoj ustalosti listov iz titana VT1–0 [Effect of regulated material removal by etching of the surface layer on the gas-saturated low-cycle fatigue life at sheets of titanium VT1-0]/ A.B. Kolomenskij, B.A. Kolachjov, A.V. Degtjarjov, A.N. Roshhupkin // The technology of light alloys. – 1990. – № 6. – pp. 20 – 24.
7. Mikrostruktura, topografija poverhnosti razrushenija i svoystva titanovykh splavov i diffuzionno–svarnyh soedinenij [The microstructure, surface topography and fracture properties of titanium alloys and the diffusion-welded joints]/ V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, I.L. Bataronov i dr. – Voronezh: Publishing and printing center "Science Book", 2014. – 216 p.
8. Sh'jumon P. Diffuzija v tvjordyh telah [Diffusion in solids]/ P. Sh'jumon. M.: Metallurgy, 1966. – 195 p.

ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕТА И ОЦЕНКИ ЗАТРАТ НА КАЧЕСТВО НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

М.И. Самогородская, С.А. Самогородская

Эффективность управления затратами на качество определяет степень эффективности функционирования системы менеджмента качества на предприятии. В соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001 - 2000 на предприятиях машиностроения должен быть предусмотрен механизм учета затрат, предусматривающий комплекс мероприятий по установлению алгоритма и методики сбора, обработки, накопления информации о затратах, а также доведения ее до руководства всех звеньев управления для последующей обработки и анализа, и принятия корректирующих мер в случае необходимости.

Однако данная задача до сих пор остается нерешенной на ряде предприятий. И даже там, где механизм учета затрат на качество функционирует, он далеко не всегда эффективен. В статье предпринята попытка систематизировать основные проблемы, возникающие в процессе организации учета и оценки затрат на качество на машиностроительных предприятиях. Представлена матрица распределения ответственности за управление затратами на качество на предприятиях машиностроения. Рассмотрены сущность механизма учета затрат на качество и мероприятия, необходимые для его организации. Проанализированы используемые в настоящее время методы сбора данных о затратах на качество: традиционный метод - основанный на использовании существующих на предприятии финансовых документов и записей, сделанных в рамках действующей системы бухгалтерского учета; метод документирования дефектов - ориентированный на получение информации о затратах на качество из записей и отчетов исключительно по качеству; метод «время и посещаемость» - строящийся на доскональном фиксировании и документировании затрат рабочего времени со стороны исполнителей.

Определены основные методы учета затрат на качество, представляющие собой системы приемов и способов организации сбора, документирования, обобщения и отражения в учете расходов, обеспечивающих необходимую информацию для калькуляции стоимости качества. Представлена информационная база, необходимая для учета затрат на качество в соответствии с принятым методом учета: калькуляции затрат на качество; калькуляции затрат, связанных с процессами; определение потерь вследствие низкого качества. Рассмотрены особенности формирования отчета о затратах на качество на машиностроительных предприятиях

Ключевые слова: система менеджмента качества, учет затрат на качество, механизм учета, отчет о затратах

Введение

В настоящее время проблема повышения качества продукции отечественного машиностроения является одной из приоритетных, поскольку данная отрасль служит технической базой для всех отраслей экономики России. Эффективность народно-хозяйственного комплекса государства в целом в значительной степени зависит от качества машиностроительной продукции. Так как стоимость производства машин и оборудования существенно ниже расходов на их последующую эксплуатацию, повышение качества машиностроительной продукции на стадии ее производства окажет значительный народно-хозяйственный эффект при дальнейшей эксплуатации станков, машин, приборов и др. [4].

У многих руководителей предприятий машиностроения сложилось убеждение, что проблема повышения качества выпускаемой продукции не может быть решена без значительных инвестиций. Отрицать необходимость вложения средств в программы повышения качества продукции с целью предупреждения брака не имеет никакого смысла. Инвестировать в качество необходимо. Однако суммы инвестиционных затрат могут оказаться на

порядок меньше потенциальных доходов, которые могут быть получены предприятиями в последствии за счет сокращения потерь от дефектов и несоответствий. Увеличивая затраты на предупреждение дефектов можно добиться снижения затрат из-за внутренних и внешних отказов и таким образом, что сократятся общие затраты предприятия, связанные с качеством продукции.

Основной целью управления затратами на качество является эффективное использование всех видов производственных ресурсов в процессе изготовления продукции. От того, насколько эффективно используются ресурсы напрямую зависит качество выпускаемой продукции и производства в целом. Таким образом, можно сделать вывод, что эффективность управления затратами на качество определяет степень эффективности функционирования системы менеджмента качества на предприятии.

Механизм учета и оценки затрат на качество

В целях управления затратами на качество и измерения их фактической величины в рамках системы менеджмента качества в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001 – 2000 на предприятии должен быть предусмотрен механизм учета затрат [2].

Механизм учёта и оценки затрат на качество предполагает комплекс мероприятий по установлению алгоритма и методики сбора, обработки,

Самогородская Марина Игоревна – ВГТУ, д-р экон. наук, доцент, e-mail: marta17@yandex.ru
Самогородская Снежана Александровна - НИУ «Высшая школа экономики», магистр, e-mail: nezabivaemaya17@yandex.ru

накопления информации о затратах, а также доведения ее до руководства всех звеньев управления для последующей обработки и анализа, и принятия корректирующих мер в случае необходимости.

При этом целью учета затрат на качество является информационное моделирование управленческих процессов обеспечения качества в соответствии с утвержденной политикой в области качества, контроль, анализ и оптимизация затрат на всех стадиях жизненного цикла изделия [11].

Учет затрат на качество должен обеспечить возможность исчисления фактической стоимости качества по конкретному виду продукции, специфицированному процессу и в целом по СМК на основании текущих записей на счетах бухгалтерского и (или) управленческого учета. Кроме того, информация, собранная в результате учета должна позволить впоследствии установить влияние отдельных статей затрат на величину стоимости качества [13].

Поскольку в стандартах ИСО серии 9000 версии 2000 г. обязательным инструментом системы менеджмента качества является учет затрат на качество, возникает проблема разработки новых форм бухгалтерской (управленческой) отчетности. До сих пор используемые стандартные формы бухгалтерского учета позволяют идентифицировать только один элемент стоимости качества продукции — потери от брака. В перспективе система отчетности и документооборота на предприятии должна кардинально измениться, что несомненно потребует значительных материальных и трудовых затрат.

Процесс управления стоимостью качества является многоаспектным и включает в себя комплекс определенных процедур. В этой связи система учета затрат на качество, регламентированная данным процессом, также будет состоять из ряда процедур. Состав элементов системы учета затрат на качество должен определяться целями управления в рамках СМК, а также зависеть от специфики деятельности и особенностей работы предприятия. В то же время, система учета затрат на качество, как и любая система учета, применяемая в конкретном субъекте хозяйствования, должна отвечать общепринятым принципам бухгалтерского учета. По отношению к бухгалтерскому учету учет затрат на качество представляет собой подсистему в системе.

Для организации учета и последующего измерения, и оценки затрат на качество на машиностроительных предприятиях рекомендуется провести следующие мероприятия:

- установить структурное подразделение, ответственное за учет затрат на качество в целом по предприятию и назначить ответственных исполнителей;

- определить структурные элементы и состав затрат исходя из специфики производственных процессов и продукции предприятия (так называемую, смету затрат на качество);

- согласовать и утвердить типовые формы отчетов о затратах в подразделениях;

- разработать методические рекомендации по порядку и процедурам учета, оценки и анализа затрат на качество;

- установить периодичность отчетности по каждому виду затрат,

- организовать в подразделениях предприятия сбор и документирование оперативной информации по элементам затрат в соответствии с принятой на предприятии классификацией затрат на качество,

- обеспечить контроль за исполнением смет;

- разработать критерии оптимизации затрат на качество;

- обеспечить сопоставимость информации о затратах, поступающей из разных источников;

- определить порядок представления и накопления сведений о фактических затратах на качество и тенденциях их изменения [5].

Поскольку затраты на качество не являются самостоятельным объектом калькуляции на предприятии, для организации системы их учета требуется директивное решение руководства предприятия. С целью достижения приемлемого соотношения затрат и результатов службе качества рекомендуется вместе с бухгалтерией определить предполагаемый комплекс элементов затрат на качество и необходимые для этого расходы на измерение соответствующих данных. Кроме того, требуется распределить ответственность между различными подразделениями предприятия по вопросам учета, оценки и анализа затрат на качество. Пример матрицы распределения ответственности за управление затратами на качество на предприятиях машиностроения представлен в табл. 1

Матрица распределения ответственности за управление затратами на качество

Направления работ	Должности					
	Генеральный директор	Представитель руководства по качеству	Цех (отдел)	Служба управления качеством	Бухгалтерия	Планово-экономический отдел
Определение категорий затрат				О	И	Си
Планирование затрат на качество	У	Р		О	И	Си
Сбор информации о потерях и затратах, связанных с качеством						
<i>в структурных подразделениях</i>			О	Р	И	Си
<i>на предприятии в целом</i>		Р		О	И	Си
Анализ информации о потерях и затратах, связанных с качеством						
<i>в структурных подразделениях</i>			О	Р	И	Си
<i>на предприятии в целом</i>		Р		О	Си	Си
Разработка корректирующих действий по результатам анализа потерь и затрат, связанных с качеством						
<i>в структурных подразделениях</i>			О	Р	Си	Си
<i>на предприятии в целом</i>	У	Р		О	Си	Си
Проведение корректирующих действий по результатам анализа потерь и затрат, связанных с качеством						
<i>в структурных подразделениях</i>		Р	О	Си	Си	Си
<i>на предприятии в целом</i>		Р		О	Си	Си
Контроль эффективности проведенных корректирующих действий		Р	Си	О		
Представление информации по результатам анализа эффективности корректирующих действий высшему руководству	И	О		Си		

Примечание: У – утверждает; Р – руководит ; О - ответственное исполнение; Си – соисполнение; И – формирование

Для отнесения затрат на качество к конкретному виду продукции, структурному подразделению, типу дефекта, времени проявления и другим признакам необходимо разработать систему классификации и кодирования элементов затрат. Это позволит использовать информацию о затратах на качество для решения комплекса проблем, связанных с совершенствованием процессов и продукции предприятия.

Для изыскания резервов снижения затрат в подразделениях предприятия необходимо организовать процесс нормирования затрат на качество в расчете на единицу продукции. А для последующего принятия решений по устранению отклонений в процессе производства продукции должны быть предусмотрены процедуры контроля и анализ затрат на качество.

Информационная база учета затрат на качество

Следующим шагом организации учета и оценки затрат на качество на предприятии является выявление источников данных о затратах. Основными источниками информации, необходимой для установления стоимости качества продукции предприятия могут быть:

отчеты о качестве, содержащие информацию о внутренних и внешних дефектах продукции, жалобах и рекламациях потребителей, изменении сортности продукции и др.;

ведомости учета затрат рабочего времени и фонда заработной платы сотрудников, привлекаемых к работам по контролю, устранению дефектов, улучшению качества продукции;

данные о расходах на процессы контроля качества продукции предприятия, устранение брака и несоответствий, улучшение качества;

отчеты по производственным расходам и отходам производства;

протоколы испытаний, контроля и др.

В базу данных рекомендуется включить следующую информацию:

стоимость всех видов материальных ресурсов, используемых для устранения обнаруженных дефектов продукции на предприятии и вне его;

расходы на оплату труда (включая дополнительную оплату и страховые взносы) работников, занятых устранением дефектов, контролем качества продукции, улучшением качества продукции;

стоимость оборудования, оснастки, инструментов, используемых для контроля продукции, устранения дефектов, улучшения качества продукции;

общие расходы предприятия, отнесенные к подразделениям, полностью или частично занятым улучшением качества продукции и др. [5].

Все данные о затратах на качество должны содержать определенные идентификационные признаки:

наименование статьи расходов;

дату проведения затрат;

величину планируемых расходов;

сумму фактических расходов;

должность и ФИО сотрудника, формирующего данные о затратах на качество.

На сегодняшний день существует несколько методов сбора данных о затратах на качество. Известный специалист в области экономики качества Дж. Шоттмиллер выделяет следующие методы:

1. Традиционный метод - основан на использовании существующих на предприятии финансовых документов и записей, сделанных в рамках действующей системы бухгалтерского учета. К недостаткам данного метода можно отнести сосредоточение внимания преимущественно на данных бухгалтерского учета (а они априори не могут дать полную информацию о затратах на качество). Кроме того, проблемой является учет не всех видов затрат и ведение учетных операций только в разрезе производственной деятельности предприятия. Преимуществами метода можно считать возможность использования уже собранной информации и обработанных данных, а также возможность увязывания затрат на качество с ценой производимой продукции.

2. Метод документирования дефектов – ориентирован на получение информации о затратах на качество из записей и отчетов исключительно по качеству. Достоинством метода является возможность получения более полной информации о затратах. Кроме того, метод позволяет сопоставлять затраты по качеству с финансовыми результатами деятельности предприятия, и как следствие – оценивать экономическую эффективность вложений. Но при этом, как и в случае с традиционным методом, некоторые сферы деятельности предприятия остаются неохваченными и использование этого метода эффективно только при наличии на пред-

приятии реально функционирующей системы менеджмента качества [14].

3. Метод «время и посещаемость» - ориентирован на доскональном фиксировании и документировании затрат рабочего времени со стороны исполнителей, что требует вовлечения в деятельность по сбору данных о затратах на качество большого числа сотрудников предприятия. С одной стороны, применение данного метода позволяет получать достаточно полную информацию о затратах на качество (в том числе - и о скрытых), но с другой стороны - требует значительных расходов на обучение сотрудников фиксированию затрат рабочего времени. При этом существенно возрастает нагрузка руководителей. Кроме того - потенциальной проблемой является возможность заведомого искажения информации о затратах непосредственными исполнителями.

4. Метод оценки – ориентирован на систематические аудиторские проверки деятельности предприятия. Преимуществом данного метода по отношению к ранее рассмотренным является нацеленность на идентификацию затрат на качество во всех сферах деятельности предприятия. К достоинствам метода можно отнести неформальный подход к оценке затрат и возможность количественного выражения результатов мероприятий, связанных с повышением качества. Недостатками метода можно считать его высокую трудоемкость, вовлечение большого числа сотрудников предприятия и привлечение высококвалифицированных экспертов.

По мнению Дж. Шоттмиллера, существенным недостатком всех рассмотренных методов является невозможность получения информации о скрытых затратах на качество, составляют подводную часть "айсберга" затрат на качество [14].

Анализ методов учета затрат на качество

Необходимый объем информации и ее структура зависит от принятого на предприятии метода учета затрат на качество.

Международный стандарт ИСО 9004-1:1994 (раздел 6) «Финансовые аспекты системы качества» рекомендует к использованию три метода учета затрат на качество [1], в основе которых заложены разные классификации затрат на качество. При этом под методом учета затрат на качество понимается система приемов и способов организации сбора, документирования, обобщения и отражения в учете расходов, обеспечивающих необходимую информацию для калькуляции.

1. Метод калькуляции затрат на качество. В контексте данного метода затраты на качество разделяются на три группы:

Группа 1: затраты на предупреждение возникновения дефектов (превентивные затраты) – так называемые инвестиции в качество.

Группа 2: затраты на оценку и контроль качества продукции - это стоимость оценки достижения требуемого качества работ, выполняемых на любой стадии, которая определяет путь последовательного прохождения товара от его инженерного замысла до утилизации.

Группа 3: затраты, обусловленные внутренними и внешними отказами продукции. Издержки вследствие внутренних отказов - это издержки из-за несоответствий или дефектов, обнаруженных внутри организации на любой стадии, петли качества до передачи изделия от поставщика к покупателю. Издержки вследствие внешних отказов - это издержки из-за несоответствий или дефектов, обнаруженных после поставки продукции заказчику (потребителю).

Первые две группы затрат относят к категории производительных, в то время как третью группу относят к убыткам.

Наибольшие проблемы возникают с оценкой затрат на предупреждение возникновения дефектов, поскольку они сопряжены с деятельностью целого ряда подразделений предприятия, большинство сотрудников которых посвящают этой работе лишь часть своего рабочего времени. Затраты на профилактику могут возникать во всех сферах деятельности предприятия: в производстве; маркетинге и сбыте; проектировании и разработках; материально-техническом обеспечении; лабораторных испытаниях; финансовом планировании и др. Основная часть затрат данной группы связана с работой специалистов службы качества и в связи с этим включает затраты заработную плату со страховыми взносами и накладные расходы. Однако степень точности их определения в большой степени зависит от точности установления времени, затраченного каждым сотрудником в отдельности. В то же время существует часть затрат на предупреждение дефектов, которые связаны с работой сторонних организаций (так называемые – контрагентские расходы). В частности – расходы сторонних организаций на обслуживание, калибровку и поверку измерительного оборудования; консультации; курсы повышения квалификации и др. определяются прямым счетом.

С идентификацией группы затрат на оценку качества проблем не возникает, так как их основной объем (более чем 90 %) составляют расходы по заработной плате специалистов, занятых контролем и испытаниями. Оценить эти затраты можно с высокой степенью точности. Оставшуюся часть затрат этой группы составляют расходы на приобретение и техническое обслуживание оборудования, используемого для нужд контроля, а также -на необходимые материалы инструменты для контроля. Серьезных проблем в оценке этих затрат также не возникает.

Часть затрат, обусловленных внутренними отказами установить достаточно легко. Так, например, расходы на оплату труда, связанного с возвратом продукции, исправлениями, повторными испытаниями и контролем, сверхурочными работами для наверстывания потерянного времени не вызывают проблем с оценкой. То же самое можно сказать по поводу материальных затрат и накладных расходов, связанных с исправлением брака и повторными испытаниями, и контролем; недополученной прибылью, связанной со снижением класса (сортности) продукции [7].

В то же время, идентифицировать расходы по заработной плате и накладные расходы, связанные с анализом причин возникновения дефектов; с работой над возвращенным изделием; с подготовкой производства к исправлениям существенно сложнее, поскольку эта деятельность осуществляется персоналом ряда служб: технического контроля; материально-технического снабжения; управления качеством. Так как каждый вовлеченный в эти процессы сотрудник вряд ли в течение всего рабочего дня решает проблемы, связанные только лишь с внутренними потерями, оценка потерь должна производиться с учетом реально затраченного на эту деятельность времени и по результирующим показателям. Говоря же в целом о затратах на качество, обусловленных внутренними отказами, необходимо отметить, что они могут быть определены с достаточной степенью точности.

Элементы затрат на качество, обусловленные внешними отказами, также включают часть расходов, которые можно установить с достаточной степенью точности. Например - расходы предприятия, связанные с возвратом бракованной продукции потребителем в течение гарантийного периода. В этом случае алгоритм оценки затрат, связанных с неисправимым браком или переделками и ремонтом, аналогичен алгоритму расчетов по внутренним потерям. Расходы предприятия, связанные с ошибками персонала различных отделов (служб) предприятия: конструкторского; технологического; экономического; сбыта; технического обслуживания; транспортного; юридического; обеспечения качества и др. идентифицировать достаточно сложно. К ним можно отнести расходы на оплату труда, накладные расходы и прочие издержки, связанные с исследованием жалоб и обслуживанием неудовлетворенных потребителей; дополнительные транспортные расходы; издержки, вызванные судебными разбирательствами и др. Установление объема этих затрат необходимо вести с учетом реально затраченного времени сотрудниками выше-названных подразделений на решение вопросов, связанных с внешними потерями.

К этой категории затрат относятся так же потери, связанные со снижением имиджа предприятия, потерей доверия потребителя и др. Специалисты рекомендуют оценивать эти затраты на уровне 2,5 % общих затрат на качество. Однако в практике работы промышленных предприятий подобные затраты часто игнорируются на основании того, что они только предположительные, их нельзя установить с определенной степенью точности.

Поскольку основным источником получения информации о затратах на качество на машиностроительных предприятиях являются данные бухгалтерского учета, считаем необходимым в контексте данного исследования рассмотреть отдельные бухгалтерские счета, на которых отражается элементы затрат на качество.

В настоящее время в действующей на российских предприятиях системе бухгалтерского учета затраты на качество в части отрицательных затрат полностью собираются по затратам на брак и рекламации (счет 28). Однако при этом списывается

не вся сумма брака, а только ее возмещаемая часть, то есть часть стоимости, которая не может быть отнесена на счет виновных лиц (счет 73) или организации (счет 63). Как ранее отмечалось, затраты, связанные с качеством, возникают во всех производственных подразделениях и службах предприятия. В связи с этим большинство элементов этих затрат сгруппированы в комплексных статьях (счета 23, 25, 26, 43) и некоторых статьях основного производства (счет 20).

Так согласно типовой номенклатуре статей в составе общепроизводственных расходов (счет 25) выделяются затраты на испытания, опыты и исследования, включающие в себя: стоимость материалов и изделий, израсходованных на осуществление опытов, исследований и испытаний; заработную плату рабочих, занятых на этих работах; стоимость услуг цехов и хозяйств; оплату работ сторонних организаций; прочие денежные расходы.

Общепроизводственные расходы (счет 26) в свою очередь включают: затраты на испытания, опыты и исследования, проводимые при входном контроле; затраты на реактивы и другие материалы, полуфабрикаты и готовые изделия для проведения испытаний и других работ, проводимых сторонними организациями; основную и дополнительную заработную плату работников общезаводских лабораторий и ОТК; погашение износа малоценных предметов и приборов лабораторий и отделов технического контроля и ремонт этих приборов.

В составе прочих производственных расходов учитываются затраты на гарантийное обслуживание и ремонт продукции; затраты на стандартизацию; другие расходы на качество [12].

2. Метод калькуляции затрат, связанных с процессами. Метод может использоваться предприятием для анализа стоимости соответствия и стоимости несоответствия любого процесса. В основе метода лежит классификация затрат при этом:

1) стоимость соответствия – это затраты, понесенные предприятием с целью удовлетворения всех сформулированных и подразумеваемых запросов потребителей при безотказности существующего процесса;

2) стоимость несоответствия – затраты, понесенные вследствие нарушения существующего процесса.

Объектом учета при организации учета затрат по процессам в бюджет является процесс или вид деятельности (как составляющая единица процесса), при этом учет рекомендуется организовать по центрам ответственности. Для каждого процесса должен быть установлен владелец - должностное лицо предприятия, которое несет непосредственную ответственность за результативность и эффективность процесса, а также должны быть выделены ресурсы, необходимые для планирования и осуществления процесса. При этом информация о расходовании ресурсов должна отражаться таким образом, чтобы их неэффективное использование (отклонение) можно было отнести на ответственное лицо.

Для идентификации затрат по процессам используются также бухгалтерская отчетность. Одна-

ко применение только инструментов бухгалтерского учета будет недостаточно. Необходимо задействовать инструменты управленческого учета, в частности - бюджетирование., под которым специалисты понимают процесс, в рамках которого осуществляется анализ производственных, сбытовых, финансовых, инвестиционных возможностей предприятия; прогнозируются основные показатели его деятельности; оцениваются достигнутые результаты в сравнении с ранее установленными критериями.

Бюджет - это финансовый документ, структурирующий плановые и фактические показатели деятельности предприятия, характеризующие динамику развития отдельных объектов и бизнес-процессов предприятия. В бюджете консолидируются учетные данные по конкретному направлению или объекту деятельности и планируются показатели работы исходя из установленных норм, с учетом опыта предыдущего функционирования. Бюджет позволяет осуществить анализ причин отклонения значений фактических показателей от плановых, в связи с чем служит качественным инструментом управления для руководителей.

Бюджеты могут разрабатываться как для отдельных подразделений (или бизнес-процессов), так и для предприятия в целом.

Основными функциями бюджета в системе экономики качества при процессном подходе являются:

планирование бизнес-процессов (видов деятельности), обеспечивающих достижение целей в области качества;

координация различных бизнес-процессов в системе менеджмента качества;

мотивация владельцев бизнес-процессов к достижению целей;

контроль текущей деятельности и обеспечение финансовой дисциплины;

база для оценки достижения плановых показателей по качеству для бизнес-процессов.

Бюджет затрат на качество является инструментом оперативного планирования, отражающим планируемые виды деятельности (операции) на предстоящий плановый период для отдельного процесса системы менеджмента качества. При этом каждому процессу соответствуют конкретные статьи затрат, анализируя которые в динамике можно выявить тенденции их изменений и оценить эффективность бизнес-процесса [12].

Особенностью бюджетного планирования является то, что он осуществляется снизу-вверх. Сметы затрат на качество (расходные части бюджета) составляются владельцами процессов, а специалисты экономических структур учитывают и анализируют отклонения по каждому центру ответственности (консолидируют бюджеты в целом и анализируют соотношение доходной и расходной частей).

На предприятии должен быть установлен единый формат отчета о затратах, включающий исчерпывающий перечень затрат на соответствие и затрат вследствие несоответствия, а также содержащий по каждому бизнес-процессу:

входы, выходы, управляющие воздействия и необходимые ресурсы;

информацию о виде используемых затрат: действительные или синтетические;

методики расчета каждого элемента затрат;

источники получения информации о затратах.

Ведение учета затрат на качество осуществляется на основе ведения субсчетов по каждому процессу или центру ответственности.

Пример группировки затрат на соответствие или несоответствие машиностроительного предприятия приведен в табл. 2.

3. Метод определения потерь вследствие низкого качества.

Потери вследствие низкого качества представляют собой расходы предприятия, которые не способствуют достижению поставленных целей. В основе данного метода лежат две задачи: определение материальных и нематериальных потерь и идентификация внутренних и внешних потерь вследствие низкого качества.

Материальные потери представляют собой внутренние и внешние затраты, возникающие вследствие появления несоответствий. К ним относятся:

внутренние затраты на плохое качество связаны с тем, что работники предприятия допустили брак. Эти затраты возникают до того момента, как продукция попадет к потребителю;

внешние затраты на плохое качество – имеют место вследствие того, что допущенные ошибки и дефекты не выявлены на предприятии до того момента, как продукция поступила к потребителю;

необоснованные инвестиции – вызваны плохо продуманными нерациональными инвестиционными решениями. В результате этого некоторые единицы основных фондов не используются совсем или используются не на полную мощность;

затраты, связанные с ущербом для окружающей среды – являются следствием недостатков технических средств защиты от вредных воздействий производства на окружающую среду.

Нематериальные потери также делятся на внутренние и внешние.

Внешние нематериальные потери – обусловлены сокращением в перспективе объемов продаж продукции и потери доли рынка вследствие неудовлетворенности потребителем качеством выпускаемой продукции.

Внутренние нематериальные потери – вызваны снижением производительности труда из-за переделок, низкого уровня использования производственных мощностей предприятия и др.

Потери вследствие неудовлетворительного качества определяются на основе данных бухгалтерских документов прямым счетом постфактум. При этом основной задачей является получение информации для принятия управленческих решений по устранению отклонений качества продукции.

Специалисты Японской ассоциации производственного обслуживания (JIPM) выделяют 16 основных видов потерь, снижающих эффективность

производственных систем. Эти потери подразделяются на три группы [3]:

1. Потери времени функционирования оборудования:

потери, вызванные поломками машин и механизмов;

потери из-за наладки оборудования;

потери из-за замены режущего инструмента;

потери при запуске оборудования;

потери из-за кратковременной остановки оборудования и его работы на холостом ходу;

потери производительности;

потери из-за дефектов и необходимости доработки продукции;

потери из-за запланированных остановок оборудования.

2. Потери рабочего времени:

потери из-за некачественного менеджмента;

потери из-за нерациональной работы транспорта;

потери из-за недостатков в организации работы производства;

потери из-за низкого уровня автоматизации производства;

потери из-за недостатков производственного мониторинга.

3. Потери энергии, сырья, материалов и времени из-за ремонта инвентаря:

потери готовой продукции;

потери энергии;

потери из-за необходимости ремонта производственного инвентаря.

Выявление затрат на плохое качество значительно повышает эффективность работы предприятия и позволяет добиться существенного улучшения конечных результатов работы. Но в то же время, этот метод не позволяет оценить объем инвестиций в улучшение качества (превентивные затраты) и эффективность этих мероприятий. Таким образом, сужаются рамки управленческого воздействия на затраты по обеспечению качества.

Рекомендованные выше методы могут приняты руководством как основополагающие при организации процесса учёта и анализа затрат на качество на предприятии.

Формирование отчета о затратах на качество

Результаты учета затрат на качество должны сводиться специалистами бухгалтерии и службы качества в различные формы (отчеты) и регулярно передаваться руководителям предприятия и подразделений. В отчетах требуется отразить информацию о динамике изменения затрат и их структуре за отчетный период. Оценка стоимости качества может выполняться ежемесячно, поквартально, за полугодие или год. В зависимости от целей предприятия в области качества или от характера необходимой информации для принятия экономически обоснованных решений в области качества оценка может проводиться по различным критериям.

В частности, отчет о структуре затрат машиностроительного предприятия может иметь следующий вид (см. табл. 2).

Таблица 2

Отчет о затратах на качество машиностроительного предприятия [5]

Группа затрат	Наименование затрат	Значение, р.		
		План	Факт	Отклонения
Предупреждение несоответствий	1. Обучение и подготовка персонала			
	2. Затраты на сертификацию продукции			
	3. Затраты на сертификацию СМК			
	4. Информационно-консультационные услуги			
	5. Поверка средств измерений используемых в производстве			
	6. Техническое обслуживание производственного оборудования			
Итого затраты на предупреждение				
Затраты на контроль и оценку соответствия продукции установленным требованиям	1. Затраты на содержание ОТК, включая затраты на входной контроль и испытания силами и средствами ОТК			
	2. Затраты на содержание отдела метрологии			
	3. Затраты на проведение испытаний в сторонних организациях			
	4. Поверка приборов и средств измерений, используемых в ОТК			
	5. Материалы, расходуемые при проведении контроля и испытаний			
Итого затраты на оценку				
Всего затраты на соответствие				
Потери от брака в производстве	1. Стоимость ТМЦ, израсходованных на исправление брака			
	2. Стоимость комплектующих изделий, если не оформлена вина поставщика			
	3. Стоимость окончательно забракованной продукции			
	4. Простои (упущенная выгода)			
Итого производственные потери				
Потери от брака, выявленного у потребителя	1. Затраты на содержание службы ремонта, включая затраты на поиск неисправностей и ремонт			
	2. Расходы на исправление дефектов силами сторонних организаций за счет средств предприятия			
	3. Стоимость ТМЦ, израсходованных на исправление брака			
	4. Командировочные расходы			
	5. Транспортные расходы, при отгрузке бракованной продукции			
	6. Расходы на отзыв продукции			
	7. Потери от продаж (упущенная выгода)			
Итого потери у потребителя				
Всего отказы				
Всего затраты на качество				

Для составления отчета о затратах на качество используются следующие показатели: фактические затраты по элементам; планируемые затраты; размер отклонений; затраты по видам продукции (по процессам).

Содержание отчёта по затратам на качество должно напрямую зависеть от того, для кого он готовится. Отчёт, предназначенный для высшего

руководства целесообразно составлять в виде общих форм, отражающих информацию в целом по предприятию или подразделению (цех, отдел).

Отчёт для высшего руководства должен выполняться в финансовых показателях, позволяющих руководителю быстро оценить реальное положение дел и получить общее представление о состоянии качества на предприятии. В этой связи ре-

комендуется использовать табличные формы, графики и диаграммы.

Отчёт для руководителей среднего уровня должен быть более детализирован и содержать развернутую информацию о достигнутом уровне качества в области той компетенции, которой владеет руководитель, получающий отчёт.

Основной принцип отчёта по затратам на качество – предоставить каждому руководителю информацию в том формате и объеме, в котором она необходима, полезна и удобна в использовании.

Информация, содержащаяся в отчете должна позволить:

сравнивать текущий уровень достижений в области затрат на качество с уровнем прошлого периода, т.е. выявлять тенденции и динамику;

сравнивать фактический уровень затрат с запланированным;

выявлять проблемные зоны в стоимости качества и определять области для улучшения качества;

оценивать эффективность мероприятий по улучшению качества.

Выводы

Организация учета и оценки затрат на качество в современных условиях является неотъемлемым элементом эффективной системы менеджмента качества машиностроительного предприятия. На основе отчетов по затратам на качество планируется и реализуется Программа качества, одной из приоритетных функций которой является стратегическое управление затратами на качество в контексте их оптимизации. Коррекция структуры затрат на качество в сторону увеличения доли превентивных затрат и постепенное снижение затрат на контроль и оценку качества в перспективе приведет к уменьшению затрат на внутренние и внешние потери – и как следствие к сокращению себестоимости выпускаемой продукции.

Компетентная организация учета затрат на качество на предприятии будет способствовать установлению обоснованных целей по повышению качества и определению необходимых для этого предупредительных мероприятий. Кроме того, рациональная система учета затрат позволит быстро идентифицировать проблемы с качеством и в этой связи разработать необходимые корректирующие мероприятия.

Таким образом - организация учета и оценки затрат на качество на машиностроительных предприятиях позволит повысить технико-экономический уровень и конкурентоспособность выпускаемой продукции, сократить затраты на

производство, увеличить эффективность производственно-хозяйственной деятельности.

Литература

1. ISO 9004-1:1994 «Общее руководство качеством и элементы системы качества – часть 1. Руководящие указания». [Электронный ресурс]: Режим доступа: http://snipov.net/c_4699_snip_98234.html
2. ГОСТ Р ИСО 9001 : 2001. Системы менеджмента качества. Требования [Текст]. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 21 с.
3. Исикава К. Японские методы управления качеством [Текст] / К. Исикава. - М.: Экономика, 1988 – 215 с.
4. Кублин, И.М. Организационные проблемы управления затратами в системе менеджмента качества машиностроительного предприятия [Текст] / И.М. Кублин, В.М. Ханин // Известия Волгоградского государственного технического университета, 15 (2013), 5, 58-64.
5. Самогородская, М.И. Экономические аспекты системы менеджмента качества: монография [Текст]/ М.И. Самогородская. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014. 226 с.
6. Самогородская, М.И. Классификация затрат на качество: сравнительный анализ основных подходов [Текст] / М.И. Самогородская // Организатор производства. - 2009. - №4. - С. 33-38.
7. Самогородская, М.И. Система экономики качества – основные задачи и принципы функционирования [Текст] / М.И. Самогородская // Регион: системы, экономика, управление. – 2010. - №3. – С. 116-120.
8. Самогородская, М.И. Экономика качества, стандартизации и сертификации [Текст] : учеб. пособие / М.И. Самогородская. - Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2009. - 220 с.
9. Самогородская, М.И. Экономические инструменты управленческих процессов обеспечения качества [Текст] М.И. Самогородская // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. - . - Т. 7. - № 11-3. - С. 90-94.
10. Система менеджмента качества: теория и методология [Текст]: монография / А.А. Попов, Е.А. Попов, М.В. Колмыкова, С.П. Спиридонов; под науч. ред. д-ра экон. наук, д-ра техн. наук, профессора Б.И. Герасимова. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 120 с.
11. Системы, методы и инструменты менеджмента качества [Текст] : учебник для вузов/ Под ред. М.М Кане. - СПб.: Питер,. 2009. 560 с.
12. Скрипко, Л.Е. Финансовый менеджмент в управлении качеством : учебное пособие [Текст] / Л.Е. Скрипко. – СПб. : Изд-во СПбГУЭФ, 2012. – 214 с.
13. Скрипко, Л.Е. Экономическое управление качеством: теория и методология [Текст] / Л.Е. Скрипко. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2006. – 203 с.
14. Шоттмиллер, Дж. Затраты на качество стимулируют процессы непрерывного совершенствования [Текст]/ Дж. Шоттмиллер// Методы менеджмента качества. – 2003. – № 2. – С. 4.

FEATURES OF ACCOUNTING AND EVALUATION OF THE COST OF QUALITY AN ENTERPRISE ENGINEERING

M. I. Samogorodskaya, Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: marta17@yandex.ru

S.A. Samogorodskaya, master, National research University "Higher school of Economics", Saint-Petersburg, Russian Federation, e-mail: nezabivaemaya17@yandex.ru

The effectiveness of cost management on quality determines the degree of effectiveness of the quality management system in the enterprise. In accordance with GOST R ISO 9001 - 2000 at the enterprises of machine-building, the cost of the accounting mechanism should be presented to provide a set of measurements for the establishment of the algorithm and methods of data collection, processing, storage cost information, and bringing it to the management of all the control units for further processing and analysis and taking corrective action if it is necessary.

However, this problem remains unresolved in several enterprises. And even where the accounting mechanism on the cost quality functions - it is not always effective. The article attempts to systematize the main problems in the organization of accounting and cost estimates on the quality of machine-building enterprises. It presents the responsibility matrix for cost management on the quality of the enterprises of machine-building. It is presented the essence of the cost-accounting mechanism on the quality and arrangements which is necessary for its organization. Analyzed data collection methods are currently used in the quality costs: The traditional method based on the use of financial documents and records made in the current accounting system of existence enterprises; defects documentation method is focused about obtaining information on the cost of the quality from the records and reports of the quality exclusively; method of "time and attendance" is being built thorough fixation and documentation of working time on the part of the workers.

It defines the basic methods of cost accounting for quality, representing the system of techniques and methods of organizing the collection, documentation, compilation and recording of expenses, providing the necessary information for the calculation of the cost of quality. Submitted information base is needed to take account of the quality in accordance with the accounting method costs: calculation on the quality costs; cost calculation processes; determining losses due to poor quality.

It shows the features of forming a cost quality report and mechanism-built enterprises

Key words: quality management system, taking into account the quality, cost accounting mechanism, cost report

References

1. ISO 9004-1:1994 ", Total quality management and quality system elements – part 1. The guidelines". [Electronic resource]: access Mode.: http://snipov.net/c_4699_snip_98234.html
2. GOST R ISO 9001 : 2001. The quality management system. Requirements [Text]. – M. : IPK publishing house of standards-tov, 2001. – 21 S.
3. Ishikawa K. Japanese methods of quality management] [Text] / K. Ishikawa. - M: Economics, 1988 – 215 p
4. Kublin, I. M. Organizational problems of cost management in the quality management system of machine-building enterprise [Text] / I. M. Kublin,..M. " // news of Volgograd state technical University, 15 (2013), 5, 58-64
5. Samogorodskaya, M. I. Economic aspects of the quality management system: monograph [Text]/ M. I. Samogorodskaya. Voronezh: FGBOU VPO "Voronezh state technical University", 2014. 226 p
6. Samogorodskaya, M. I. Classification of quality costs: a comparative analysis of the main approaches [Text] / M. I. Samogorodskaya // Production organizer. 2009. - No. 4. - P. 33-38.
7. Samogorodskaya, M. I. the System of economy of quality – the main tasks and principles of functioning [Text] / M. I. Samogorodskaya // Region: systems, economics, management. – 2010. - No. 3. – Pp. 116-120.
8. Samogorodskaya, M. I. Economics of quality, standardization and certification [Text] : textbook. allowance/ M. I. Samogorodskaya. - Voronezh: GOUVPO " Voronezh state technical University", 2009. 220 p.
9. Samogorodskaya, M. I. Economic tools management processes quality assurance [Text] Samogorodskaya M. I. // Bulletin of Voronezh state technical University. – 2011. - . - T. 7. No. 11-3. - P. 90-94.
10. The quality management system: theory and methodology [Text]: monograph / A. A. Popov, E. A. Popov, M. V. Kolmykova, S. P. Spiridonov; under scientific. ed. d-RA Ekon. Sciences, Dr. Techn. Sciences, Professor B. I. Gerasimov. – Tambov: Publishing house GOU VPO TGTU, 2010. – 120 p
11. System, methods and tools of quality management [Text] : textbook for universities/ Under the editorship of M. M. Cana. - SPb.: Peter. 2009. 560 p.
12. Skripko, L. E. The financial management in quality management : textbook [Text] / L. E. Skripko. – SPb. : Spbguef, 2012. – 214.
13. Skripko, L. E. Economic quality management: theory and methodology [Text] / L. E. Skripko. – SPb.: Spbguef, 2006. – 203 p.
14. Scottmiller, John. Quality costs incentive research within the continuous improvement processes [Text]/ J. Scottmiller.// Methods of quality management. – 2003. – No. 2. – C. 4.

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Е.П. Енина

В проекте Федерального бюджета РФ на 2017 г. и на плановый период до 2019г. предусмотрен долгожданный рост ВВП. Существующие экономические методы могут обеспечить нам максимум 1-1.5% роста ВВП в год, что явно недостаточно для настоящего подъема экономики. Предстоящие расходы бюджета необходимо соизмерять с финансовыми резервами. Поэтому проблема эффективной и результативной экономики приобретает сегодня огромное значение, в связи с чем реализация экономической политики в условиях финансовых ограничений особенно актуальна.

В данной статье сделана попытка рассмотреть результативность функционирования предприятия машиностроения (ПМ) через модель, использующую марковские и полумарковские стационарные процессы. Аппарат теории случайных процессов для вычисления показателей результативности функционирования предприятий машиностроения позволил установить зависимости показателя результативности функционирования ПМ от характеристик процесса, переменных управления и параметров состояния.

Анализ процессов функционирования ПМ на разных уровнях иерархии позволил произвести оценку результативности мероприятий с целью увеличения или уменьшения воздействия факторов. Область применения рассмотренного метода вычисления показателя результативности процесса функционирования ПМ определяется конкретной задачей исследования

Ключевые слова: эффективность, результативность, детерминированные процессы, функционирование предприятий машиностроения

Предлагаемая методика делает попытку рассмотреть результативность функционирования предприятий машиностроения (ПМ) через модель, использующую частные виды марковского, полумарковского и стационарного процессов. Совокупность процессов, рассматриваемых при обосновании ПМ, представляет собой сложную многосвязную систему процессов. Наиболее существенным для анализа этой системы процессов является иерархичность ее структуры, позволяющей установить иерархию показателей результативности, наиболее полно отражающих функционирование ПМ на каждом уровне. Правильный выбор системы показателей результативности позволяет, не нарушая принципов системного подхода, разделить ее анализ в ряд в значительной мере самостоятельных исследований отдельных уровней иерархии.

В качестве показателя результативности процессов функционирования средств и сил на предприятиях машиностроения (ПМ) может быть принят объем выполненных работ по каждому процессу за определенное время. В общем случае объем выполненных работ в ходе осуществления процесса за определенное время является случайной функцией времени и может быть выражен законами распределения конечного результата процесса.

При применении аппарата теории случайных процессов для вычисления показателей результативности процессов необходимо детально рассматривать процессы и устанавливать зависимости показателя результативности от характеристик процесса, переменных управления и параметров состояния. При этом представляет практический интерес возможность сведения реального процесса к частным

видам как марковский [8], полумарковский [8] и стационарный [3] процессы [1, 2,3,4,5].

Для проведения оптимизации необходимо знать для каждого процесса (этапа, операции) зависимости затрат от характеристик средств и сил, участвующих в реализации этого процесса (этапа, операции) и характеристик самого процесса. Например, затраты на осуществление процессов за время t , протекающее на данном уровне иерархии, определяются по формуле:

$$S_{\text{нц}}(t) = S_{\text{он}}(t) + S_{\text{обч}}(t) + S_{\text{обл}}(t) \quad (1)$$

где $S_{\text{он}}(t)$ - затраты, связанные непосредственно с основными процессами;

$S_{\text{обч}}(t)$ - затраты на реализацию процессов, обеспечивающих основные процессы;

$S_{\text{обл}}(t)$ - затраты на реализацию процессов, обслуживающих основные процессы.

По каждому основному, обеспечиваемому и обслуживаемому процессу должны учитываться затраты на средства и силы и реализацию процесса. Для нахождения слагаемых затрат (1) в рамках одного процесса (этапа) находятся: - количество средств, комплексов или комплектов средств, которое осуществляет данный процесс (этап); - количество формирований каждого типа, участвующих в реализации этого процесса (этапа) и имеющих на оснащении указанные средства; - характеристики процесса (этапа): внешние условия протекания процесса (этапа), продолжительность выполнения работ каждого вида, требования к конечному результату процесса (этапа) и т.д.

Кроме указанной информации, необходимо иметь так же соответствующие стоимостные характеристики разработки и производства, хранения и эксплуатации средств, комплексов или комплектов средств. Методические вопросы определения отме-

ченных стоимостей и показателей стоимости процессов, производных от них, изложены в работах [5,6,7]. В качестве интегрального показателя принимается показатель эффективности, который непосредственно связан с показателями результативности процессов. Среди процессов выбирается основной, а остальные включаются в обеспечивающие и обслуживающие процессы.

Использование процессов функционирования предприятий машиностроения (ПМ) на разных уровнях иерархии позволяет производить оценку результативности мероприятий с целью уменьшения или увеличения результатов воздействия факторов. Характеристики мероприятий могут быть учтены при вычислении показателей результативности этапов основного процесса и показателей результативности процессов их обеспечения и обслуживания.

При изменении функционирования системы ПМ его состояние будет описываться совокупностью величин, изменяющихся случайным образом. Отсюда следует, что показатель результативности процесса должен отражать случайный характер конечного результата. Для определения показателя результативности процесса в форме закона распределения конечного результата используем аппарат марковского и полумарковского процессов с дис-

кретными состояниями и непрерывным временем. Исходные понятия по этим процессам изложены в ряде работ, в частности [4,5,6,7,8].

Анализ процессов функционирования подсистем и процессов выполнения работ показывает, что переход физической системы из одного состояния (этапа процесса) в другое состояние (к другому последующему этапу процесса) можно охарактеризовать как марковский или полумарковский процесс. Вероятность состояния системы S_i, S_{i+1}, \dots, S_n в рамках одного процесса зависит только от ее состояния в настоящем j и не зависит от того, когда и каким образом система пришла в это состояние. Так как процесс марковский, то законы распределения времени пребывания системы в данном состоянии не зависят от того, сколько времени система уже пробыла в этом состоянии, т.е. этот закон показательный [3,5,6,7,8].

Для определения вероятностей состояния системы с односторонним переходом, в которой протекает марковский или полумарковский циклический процесс с дискретными состояниями и непрерывным аргументом процесса, может быть использована следующая система дифференциальных уравнений, полученных с учетом [5,6]:

$$\begin{aligned} P_0(t) &= F_{n_0}(\tau_{n_0}, t) \lambda_{n_0}(t) \tilde{W}_{n_0}(t) P_n(t) - F_{01}(\tau_{01}, t) \lambda_{01}(t) \tilde{W}_{01}(t) P_0(t), \\ P_1(t) &= F_{01}(\tau_{01}, t) \lambda_{01}(t) \tilde{W}_{01}(t) P_0(t) - F_{12}(\tau_{12}, t) \lambda_{12}(t) \tilde{W}_{12}(t) P_1(t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$P_n(t) = F_{n-1, n}(\tau_{n-1, n}, t) \lambda_{n-1, n}(t) \tilde{W}_{n-1, n}(t) P_{n-1}(t) - F_{n_0}(\tau_{n_0}, t) \lambda_{n_0}(t) \tilde{W}_{n_0}(t) P_n(t),$$

$$\sum_{j=1}^n P_j(t) = 1, j = \overline{0, n}.$$

Для $t = 0$ задаются начальные значения вероятностей $P_0(0), P_1(0), \dots, P_n(0)$

Условные обозначения:

n - возможное число состояния системы;

$P_j(t)$ - вероятность нахождения системы в состоянии j в момент t ;

$F_{j,j+1}(\tau_j, t)$ - функция распределения времени t , в течение которого система находится в состоянии j при переходе в момент t в состояние $j + 1$;

$F_{n_0}(\tau_n, t)$ - функция распределения времени τ_n , в течение которого система находится в состоянии n при переходе в момент t в состоянии 0 ;

$\lambda_{j,j+1}(1)$ - интенсивность потока событий, переводящего в момент t систему из состояния j в состояние $j + 1$;

$\lambda_{n_0}(t)$ - интенсивность потока событий, переводящего в момент t систему из состояния n в состояние 0 ;

$\tilde{W}_{ij}(t)$ - вероятность, характеризующая уменьшение интенсивности перехода системы из состояния i в состояние j .

Значение вероятности $\overline{W}_{1j}(t)$ находится из следующей формулы:

$$\overline{W}_{1j}(t) = [P_{H_1}(\bar{t}_1 \times \dots \times P_{H_n}(\bar{t}_n))] \times \left\{ \prod_{i=1}^{n_{l_1}} R_{l_1}(t - \bar{t}_1) \dots \times \prod_{l_n}^{n_{l_n}} R_{l_n}(t - \bar{t}_n) \right\} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 2, 3, \dots, I.$$

где $P_{H_{1,2,\dots,n}}(t - \bar{t}_{1,2,\dots,n})$ - вероятность, характеризующая надежность функционирования образцов в процессе выполнения работы на $1, 2, \dots, n$ -ом этапах (операциях) и вычисляемая на момент $t - \bar{t}_{1,2,\dots,n}$;

$R_{l_{1,2,\dots,n}}(t - \bar{t}_{1,2,\dots,n})$ - вероятность того, что к моменту времени $(t - \bar{t}_{1,2,\dots,n})$, осуществлено обес-

печение и обслуживание $1, 2, \dots, n$ -го этапа (операции) при выполнении работ;

$l_{1,2,\dots,n}$ - номера процессов обеспечения и обслуживания, связанные соответственно с $1, 2, \dots, n$ -ми этапами основного процесса, которые они обеспечивают и обслуживают;

n_{l_1, l_2, \dots, l_n} - количество процессов обеспечения и обслуживания, относящихся соответственно к $1, 2, \dots, n$ -му этапу;

$\bar{t}_{1,2,\dots,n}$ - МОЖ закона распределения работного времени 1,2,..., n -го этапа (операции).

Выражение (4) записано исходя из того, что на один этап основного процесса оказывают влияние процессы обеспечения и обслуживания независимо друг от друга. Это условие выполняется практически для большинства рассматриваемых процессов. Учитывая характер изменения надежности функционирования времени работы образца, можно с достаточной для практических расчетов точностью находить каждую из вероятностей

$$P_{H_1}(\bar{t}_1), \dots, P_{H_n}(\bar{t}_n) \quad (4)$$

по формулам (4) [8,9]:

при последовательном действии образцов на каждом этапе (операции):

$$\bar{P}_{H_{ij}}^{(nc)}(\bar{t}_1) = \bar{G}_{ij}^{(nc)}(\bar{t}_i) P_{H_{ij}}(\bar{t}_i) = \prod_{j=1}^{m_i} \bar{P}_{H_{ij}}^{(nc)}(\bar{t}_i) \quad (5)$$

при параллельном действии образцов на каждом этапе (операции):

$$P_{H_i}^{(nc)}(\bar{t}_1) = 1 - \prod_{j=1}^{k_i} [1 - \bar{P}_{H_{ij}}^{(nc)}(\bar{t}_1)], \quad (6)$$

$$P_{ij}^{(nc,np)}(\bar{t}_i) = \bar{Q}_{ij}(\bar{t}_i) P_{H_{ij}}(\bar{t}_i), \quad (7)$$

$$P_{H_{ij}}(t_i) = \frac{T_{ij}^{(H)}}{T_{ij}^{(H)} + T_{ij}^{(B)}} \exp \left[- \left(\frac{T_{ij}^{(H)} + T_{ij}^{(B)}}{T_{ij}^{(H)} \times T_{ij}^{(B)}} \right) \bar{t}_i \right], \quad (8)$$

где $T_{ij}^{(H)}$ - среднее время наработки на один отказ j -го образца, действующего на i -м этапе (операции);

$T_{ij}^{(B)}$ - среднее время восстановления 3 -го образца, действующего на 1 -м этапе (операции);

$\bar{Q}_{im,k}(t)$ - вероятность невыхода из строя $m(k)$ -го образца, действующего на 1 -м этапе (операции).

В случае, когда временем восстановления можно пренебречь, имеем:

$$P_{H_{ij}}(t_i) = \exp \left(- \frac{t_i}{T_{ij}^{(H)}} \right), \quad (9)$$

Вероятности $R_{1,2,\dots,n}(t)$ рассчитываются по аналогичным для вероятности $\bar{W}_{1,2,\dots,n}(t)$ зависимостям, так как в свою очередь каждый процесс обеспечения и обслуживания нуждается в обеспечении и обслуживании. Поэтому предварительно определяется структура процессов обеспечения и обслуживания применительно к данному образцу.

Для характеристики объема выполненной в рамках одного процесса работы как прерывной случайной величины для практики может представлять наибольший интерес определение вероятности выполнения ровно n , не менее $K(t)$ и не более $I^0(t)$ единиц объема работ данного вида

$$R_{n_{1,2,\dots,n},r_n}(t) = P[N(t) = n^0(t)], \quad (10)$$

$$R_{k_{1,2,\dots,n},r_k}(t) = P[K(t) = k^0(t)], \quad (11)$$

$$R_{I_{1,2,\dots,n},r_I}(t) = P[L(t) \leq I^0(t)], \quad (12)$$

Для вычисления вероятностей $R_{n_{1,2,\dots,n},r_n}(t)$, $R_{k_{1,2,\dots,n},r_k}(t)$, $R_{I_{1,2,\dots,n},r_I}(t)$ необходимо предварительно найти закон распределения единиц объема работ 1,2,..., r -го вида в функции времени. Для дискретной случайной величины объема работ этот закон характеризуется вероятностями, вычисляемыми по формулам [4, 5]:

$$R_n(t) = P[N(t) = n^0(t)] = W_{j=n^0(t)}(t), \quad (13)$$

$$R_k(t) = P[K(t) \geq n^0(t)] = \sum_{j=k^0}^{K(t)} W_j(t), \quad (14)$$

$$R_I(t) = P[L(t) \leq I^0(t)] = \sum_{j=0}^{I^0(t)} W_j(t), \quad (15)$$

где $W_j(t)$ - вероятность выполнения ровно t_0 единиц объема работ.

Из приведенных зависимостей видно, что для вычисления искомых вероятностей необходимо находить ряд распределения единиц объема работ в функции времени в рамках одного процесса.

Выполнение к моменту t заданного объема работ в рамках одного процесса можно рассматривать как повторение несколько раз опыта с выполнением t_0 единиц объема работ в каждом с постоянной вероятностью $W_{1,2,\dots,n}(t)$. Отсюда имеем ряд распределения единиц объема выполненной к моменту t работы:

$$W_j(t) = C_{n_j}^j [W_{1,2,\dots,n}(t)]^j [1 - W_{1,2,\dots,n}(t)]^{n_j - j} \quad (16)$$

где n_j - максимально возможное количество j -х единиц объема работ, рассматриваемых в рамках данного процесса;

$C_{n_j}^j$ - биномиальные коэффициенты.

Полученные результаты

При вычислении закона распределения конечного результата процесса наиболее общим методологическим путем является нахождение ряда вероятностей выполнения к моменту времени t объема работ, то есть определение вероятностей:

$$W_0(t), W_1(t), \dots, W_j(t) \quad (17)$$

Используя аппарат марковских и полумарковских процессов, для нахождения ряда (4) получим следующую систему дифференциальных уравнений:

а) $j = 0$

$$W_0(t) = -F_{0,1}(\tau_0, t)\lambda_1(t)W_0(t) + F_{10}(\tau_1, t)\lambda_2(t)W_1(t),$$

б) $j = 1, 2, \dots, j - 1$

$$W_j(t) = -[F_{j,j-1}(\tau_j, t)\lambda_2(t) + F_{j,j+1}(\tau_j, t)\lambda_1(t)]W_j(t) + F_{j-1,j}(\tau_{j-1}, t)\lambda_1(t)W_{j-1}(t) + F_{j+1,j}(\tau_{j+1})\lambda_2(t)W_{j+1}(t) \quad (18)$$

в) $j = J(t)$

$$W_{j(t)}(t) = -F_{j,j-1}(\tau_j, t)\lambda_2(t)W_j(t) + F_{j-1,j}(\tau_{j-1}, t)\lambda_1(t)W_{j-1}(t)$$

$$\sum_{j=0}^{J(t)} W_j(t) = 1, j = \overline{0, j}.$$

Начальные значения $W_0(0), W_1(1), \dots, W_j(0)$ задаются из физических соображений.

Величина $\lambda(j)$ по существу играет ту же роль, что и произведение $\lambda(j)\tilde{W}(t)$ и в системе уравнений (2).

Кроме того, в системе уравнений (18) обозначены:

$J(t)$ - возможное максимальное число состояний системы на момент t ;

$\lambda_1(t)$ - интенсивность так называемого приведенного потока событий, переводящего в момент t систему из состояния j в состояние $j + 1$;

$\lambda_2(t)$ - интенсивность приведенного потока событий, переводящего в момент t систему из состояния $j + 1$ в состояние j .

Для указанных состояний системы может быть получена следующая система дифференциальных уравнений [5]:

$$P_0(t) = -\lambda(t)P_0(t) + \mu(t)P_1(t),$$

$$P_1(t) = \lambda(t)P_0(t) - [\lambda(t) - \mu(t)]P_1(t) + 2\mu(t)P_2(t),$$

$$P_k(t) = \lambda(t)P_{k-1}(t) - [\lambda(t) + K\mu(t)]P_k(t) + (K + 1)\mu(t)P_{k+1}(t),$$

$$P_p(t) = \lambda(t)P_{p-1}(t) - [\lambda(t) + \rho\mu(t)]P_p(t) + [\rho\mu(t) + v(t)]P_{p+1}(t), \quad (19)$$

$$P_{p+1}(t) = \lambda(t)P_{p+s-1}(t) - [\lambda(t) + \rho\mu(t) + sv(t)]P_{p+s}(t) + [\rho\mu(t) + (s + 1)v(t)]P_{p+s+1}(t),$$

$$P_{p+m}(t) = \lambda(t)P_{p+m-1}(t) - [\lambda(t) + \rho\mu(t)]P_{p+m}(t),$$

$$\sum_{j=0}^{\rho+m} P_j(t) = 1, j = \overline{0, \rho + m}. \quad (19)$$

Решение приведенной системы уравнений и выходные характеристики этой системы можно найти в [3,4,5].

После того как будут получены вероятности состояний физической системы, используя зависимости, изложенные в [4,5], можно рассчитать большой перечень показателей анализа системы функционирования ПМ.

Конечный результат оценки результативности процесса характеризуется величиной МОЖ, определяемой по формуле:

$$M_n(t) = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i)W_{1,2,\dots,i}(t), \quad (20)$$

где n - число процессов (этапов), реализуемых за время t ;

$P(x_i)$ - вероятность того, что при i -м этапе (операции) выполняется объем работ, равный x_i единиц;

$W_{1,2,\dots,i}(t)$ - вероятность того, что к моменту времени t состоялись $1, 2, \dots, i$ - ые этапы (операции).

Выводы. Показатель результативности характеризует степень выполнения своих функций от-

дельным средством, комплексом или комплектом средств, формированием, группировкой формирований и отраслевыми звеньями в предприятиях машиностроения (ПМ). Показатель результативности выражается через объем выполненных функций (например, количество продукции, произведенного предприятием за определенное время).

В результате рассмотрения процессов функционирования звеньев экономики и процессов действий формирований установлено, что показатель результативности каждого из этих процессов и их этапов могут быть найдены путем последовательного применения систем дифференциальных уравнений двух типов и связывающих их вероятностных соотношений, имеющих как для систем, так и соотношений одинаковую структуру.

Область целесообразного применения каждого из указанных методов вычисления показателей результативности процессов на предприятиях машиностроения определяется конкретной задачей исследования. Однако можно заметить, что статистическое и имитационное моделирование более широко применяется в тех случаях, когда структура исследуемого объекта достаточно полно известна.

Аналитические методы на основе теории случайных процессов более предпочтительно приме-

нять для отыскания области решения задач, когда характеристики исследуемой системы известны ориентировочно или когда характер законов распределения исходных данных и их параметры определены неточно.

Правильный выбор системы показателей результативности позволяет, не нарушая принципов системного подхода, разделить ее анализ в ряд в значительной мере самостоятельных исследований отдельных уровней иерархии.

Литература

1. Блауберг, И.В. Системные исследования и общая теория систем [Текст] /И.В. Блауберг, В.Н. Садовский, Э.Г. Юдин. – Системные исследования. Ежегодник. – М.: Наука, 1989. – 330 с.
2. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем [Текст] / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978.-399с.
3. Вентцель, Е.С. Исследование операций [Текст] / Е.С. Вентцель. – М.: Советское радио, 1972.– 552 с.

4. Енина, Е.П. Научное обеспечение управления агропромышленным комплексом [Текст]: монография / Е.П. Енина. – М.: Академический Проект, 2004. – 368 с.

5. Енина, Е.П. Теория вероятностей и математическая статистика в экономике [Текст]:учеб.пособие для студентов экономических вузов / Е.П.Енина. – Воронеж: Изд-во НПО «Модэк», 1998. – 238 с.

6. Корбут, А.А. Дискретное программирование [Текст] / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

7. Моисеев, Н.Н. Элементы теории оптимальных систем [Текст] / Н.Н. Моисеев. – М.: Высшая школа, 1975. – 526 с.

8. Тихонов, В.И. Марковские процессы [Текст] / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.

9. Ховард, Р.А. Динамическое программирование и марковские процессы [Текст] /Р.А. Хорвард. – М.: Советское радио, 1964. – 170 с.

10. Sala, M. Resolution del pert-costeme dian teprograma cion multicriterio: aplicacion un proyecto de inversion ganadera /M. Sala., A. Tena// Investig. Agr.Econ. - 1997. - Vol. 12, № 1-3. - P. 357 - 373.

Воронежский государственный технический университет

THE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE PROCESSES FUNCTIONING AT MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

E.P. Enina, Doctor of Economic Sciences, Full Professor, Voronezh state technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: 74938e@rambler.ru

In the draft Federal budget until 2017 and the planning period until 2019. provided the long-awaited GDP growth. Existing economic methods can provide us a maximum of 1-1.5% GDP growth per year, which is clearly insufficient for a real economic recovery. Expenditures of the budget must commensurate with the financial reserves. Therefore, the problem of effective and efficient economy has taken on great importance in connection with the implementation of economic policy in the conditions of financial constraints is particularly relevant.

This article attempts to examine the effectiveness of the enterprise engineering (PM) through the model using Markov and semi-Markov stationary processes. The theory of stochastic processes to calculate the performance indicators of the functioning of engineering enterprises allowed to establish the dependence of the performance indicator of functioning of PM from the process characteristics, control variables and state parameters.

Analysis of processes of functioning of PM at different levels of hierarchy allowed us to assess the effectiveness of interventions to increase or decrease exposure factors. Scope reviewed-tion of the method of computation of the performance indicator of the process of functioning of PM is determined by the specific task of the study

Key words: efficiency, effectiveness, deterministic processes, functioning of engineering enterprises

References

1. Blauberger, I. V. Sadovskiy V. N., Yudin E. G. Sistemnie issledovaniya I obshaya teoriya sistem [Systems research and General systems theory][Text] /I. V. Blauberger. – System studies. Yearbook. – М.: Nauka, 1989. – 330 p.
2. Buslenko, N. P. Modelirovanie slozhnykh sistem [Modeling of complex systems].– М.: Nauka, 1978.-399с.
3. Wentzel, E. S. Issledovanie operacii [Operations Research].– М.: Soviet radio, 1972.– 552 p.
4. Enina, E. P. Nauchnoe obespechenie upravleniya agropromishlennim kompleksom [Scientific management AG-reproma chine complex][Text]: monograph / E. P. Enina. – М.: Academic Project, 2004. – 368 p
5. Enina, E. P. Teoriya veroiatnostei I matematicheskaya statistika v ekonomike [Probability Theory and mathematical statistics in Economics][Text]:text book.a manual for students of economic high schools. – Voronezh: Publishing house NPO "Modek", 1998. – 238 p
6. Korbut A. A., Finkelstein Yu. Yu. Diskretnoe programmirovaniye [Discrete programming].– М.: Nauka, 1969. – 368 p
7. Moiseev, N. N. Elementi teorii optimalnykh sistem [Elements of the theory of optimal systems]. – М.: Higher school, 1975. – 526 p.
8. Tikhonov V. I., Mironov M. A. Markovskie processi [Markov processes]. – М.: Soviet radio, 1977. – 488 p
9. Howard, R. A. Dinamicheskoye programmirovaniye I Markovskie processi [Dynamic programming and Markov processes]. – Moscow: Sovetskoye radio, 1964. – 170 p.
10. Sala, M., Tena A. del Resolution pert-costeme dian teprograma cion multicriterio: aplicacion un proyecto de inversion ganadera // Investig. Agr.Econ. - 1997. - Vol. 12, No. 1-3. - P. 357 - 373.