

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

Методика расчета инструмента с непрофилированной рабочей частью А.Ю. Рязанцев, О.Н. Кириллов.....	4
Моделирование процесса модификации изменения толщины покрытий С.В. Сафонов.....	8
Механизм чистовой обработки электродом - щёткой А.Ю. Рязанцев, О.Н. Кириллов.....	13

Информатика, вычислительная техника и управление

Задача оптимизации параболической системы с запаздыванием и распределенными параметрами на графе С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов.....	18
Разработка распределенной системы организации доступа к электронному архиву с помощью мобильного терминала А.Д. Поваляев, С.Л. Подвальный, А.И. Сукачев, А.М. Нужный.....	28
Модификация метода Беллмана решения динамической задачи о ранце Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский.....	31
Оценка эффективности применения быстрого дискретного сплайнового вейвлет- преобразования для ослабления коррелированности дискретно заданных данных И.А. Блатов, Ю.А. Герасимова.....	34
Недетерминированное моделирование гидродинамических процессов использованием модуля ANSYSDESIGNXPLORER А.В. Кретинин, Д.Н. Галдин, Д.П. Шматов.....	37

Энергетика

Модель прогнозирования регионального энергопотребления на базе нечёткой нейронной сети В.Л. Бурковский, В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд.....	41
Интенсификация теплообмена в регенеративных теплообменных аппаратах ГТУ при применении рельефных рёбер А.А. Пригожин, С.В. Дахин.....	47
Алгоритмизация управления диверсной системой комплексной защиты блоков АЭС Е.В. Андропов, И.Р. Коган, В.П. Поваров, Л.П. Павлов.....	51
Разработка параметризованной модели проточной части подвода центробежного насоса в среде ANSYS WORKBENCH А.А. Цыганов, Д.П. Шматов, К.В. Кружаев, А.В. Гаганов.....	59
Оптимизация конструкции теплообменного аппарата методами вычислительной гидромеханики А.В. Кретинин, Е.Е. Куликова, К.Д. Булыгин.....	63
Математическая модель электродвигателя с жестко присоединенной инерционной нагрузкой ХлайнгМьйо Вин, В.Н. Шамберов.....	67

Радиотехника и связь

Методика обоснования требований к коэффициенту ослабления аэрозольного образования для прерывания радиолинии управления М.Г. Калашников, В.Г. Керков, С.В. Утемов.....	72
---	-----------

Оптимальное проектирование радиоэлектронных модулей с учетом механических воздействий	
А.В. Турецкий	75
Автоматизация выявления сбоев передачи данных в системах цифрового телевидения	
А.Б. Токарев, А.А. Саликов, А.В. Муратов	80
Адресная обработка данных в разностно-дальномерных системах при определении координат воздушных целей	
Д.А. Алексеев, С.Ю. Белецкая, А.Б. Токарев	84

Физика

Термовольтаический эффект в двухслойной структуре $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10} - [\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$	
В.В. Бавыкин, Ю.Е. Калинин, Л.В. Канивец, А.С. Шуваев	89
Электротранспортные свойства широкозонных оксидов многослойных пленок	
И.В. Бабкина, О.В. Жилова, К.Г. Королев, В.А. Макагонов, П.М. Хлоповских	93
Структура и электрические свойства многослойных пленок на основе композитов ферромагнетик-диэлектрик	
Х.С.М. Аль Аззави, К.Г. Королев, В.А. Макагонов, А.В. Ситников, О.С. Тарасова	100
Амплитудные зависимости диэлектрических потерь в кристалле KN_2PO_4 .	
Р.С. Алыкхазаали, Д.А. Лисицкий, Л.Н. Коротков	108
Высокочастотные магнитные свойства многослойных гетерогенных пленок на основе нанокompозитов ферромагнитный металл-диэлектрик	
Х.С.М. Аль Аззави, К.Г. Королев, В.А. Макагонов, А.В. Ситников, О.С. Тарасова	112
Реверсивная диэлектрическая нелинейность композиционного материала на основе полистирола и титаната бария	
В.М. Аль Мандалави, Н.А. Емельянов, Т.Н. Короткова, Л.Н. Коротков ..	119
Влияние материала матрицы на магнитотранспортные свойства наногранулированных композитов Fe-Al-O и Fe-Nb-O	
О.В. Стогней, А.Дж.Аль-Малики, А.А. Гребенников, К.И. Семененко, А.Н. Смирнов	123
Нелинейные свойства гранул и межгранульной среды высокотемпературных сверхпроводников системы Bi-Sr-Ca-Cu-O	
И.М. Голев, А.В. Сергеев, В.Г. Кадменский, О.В. Калядин	129
Износостойкость композиционных электрохимических покрытий, упрочненных углеродными наноматериалами	
О.Д. Козенков, Т.В. Пташкина, А.Т. Косилов, Д.Г. Жилияков	135

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНСТРУМЕНТА С НЕПРОФИЛИРОВАННОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТЬЮ

А.Ю. Рязанцев, О.Н. Кириллов

В работе предложен новый подход к проектированию рабочей части непрофилированного электрода - щетки, где учитывается жесткость обрабатываемого участка и возможность поддержания требуемой точности обработки при сложном контуре заготовки. Рассмотрено влияние формы заготовки на параметры непрофилированного инструмента для чистовой обработки заготовок

Ключевые слова: непрофилированный электрод - инструмент, параметры электрода - щетки, габариты, шаг инструмента

Введение

В статье рассмотрены вопросы создания непрофилированного электрода-инструмента для комбинированной размерной обработки. Это позволит обеспечить в едином технологическом процессе, без смены и подналадки оборудования, универсальным проволочным инструментом интенсивную обработку с получением заданного распределения остаточных напряжений в поверхностном слое и обеспечением качества изделий из токопроводящих материалов различной геометрической формы. Обработка непрофилированным электродом-щеткой достаточно хорошо изучена и использована при съеме припуска с металлических изделий, но применение этого метода для создания требуемого уровня остаточных напряжений в поверхностном слое деталей с ограниченной жесткостью практически не рассматривалось. Поэтому изложенное в статье направление работ следует считать как перспективное для машиностроения. С учетом требований разработчиков авиационной и космической техники новых поколений обоснованный выбор метода формирования карты остаточных напряжений и проектирование инструментов для их использования отвечает современным задачам, решаемым в области машиностроения.

С усложнением формы составляющих элементов современной наукоемкой продукции машиностроения, увеличением удельной нагрузки на конструкцию под действием наследственных явлений происходит изменение формы деталей, возникают погрешности, способные нарушить качество всего изделия.

Значительное влияние на точность формы оказывают остаточные напряжения и их равномерность, а также наклеп. Для повышения качества изделий требуется проектирование инструментов, обеспечивающих получение и сохранение заданной геометрической формы, особенно крупногабаритных сложноконтурных деталей малой жесткости.

Расчет габаритов электрода-щетки

На чистовом этапе обработки геометрия заготовки приобретает профиль, близкий к заданному для детали.

Для снижения величины прижима (Pr) необходимо максимально приблизить наружный профиль инструмента к форме обрабатываемого участка заготовки, которая может иметь различные радиусы (R) искривления.

Обрабатываемая поверхность имеет переменный профиль. Для расчета принимают минимальные значения R_1 и R_2 (рис.1).

Диаметр втулки (D_{em}) назначается с учетом посадочных диаметров шпинделя станка и, как правило, не рассчитывается.

Тогда диаметр инструмента

$$D_u = 2l_n + D_{em} + 2Pr \leq 2R_1 \quad (1)$$

Откуда может быть вычислена длина вылета проволоки l_n

$$l_n = R_1 - Pr - 0,5D_{em} \quad (2)$$

Ширина электрода-щетки (B) находится из условия, что концы проволоки всегда, как минимум, касаются обрабатываемой поверхности и очищают ее для анодного снятия припуска (рис.1, б)

$$B \leq 2\sqrt{\Delta h(2R_2 - \Delta h)} \quad (3)$$

Если учесть, что критерием нормального процесса работы электрода-щетки является

Рязанцев Александр Юрьевич - ВГТУ, аспирант, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru

Кириллов Олег Николаевич - ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: kirillov.olli@yandex.ru

$$Pr \geq \Delta h \quad (4)$$

то $B = 2\sqrt{Pr(2R_2 - Pr)}$. Отсюда находят сечение пучков для обработки заготовок с минимальным радиусом изгиба (R_2) и перепадом неровностей (Δh).

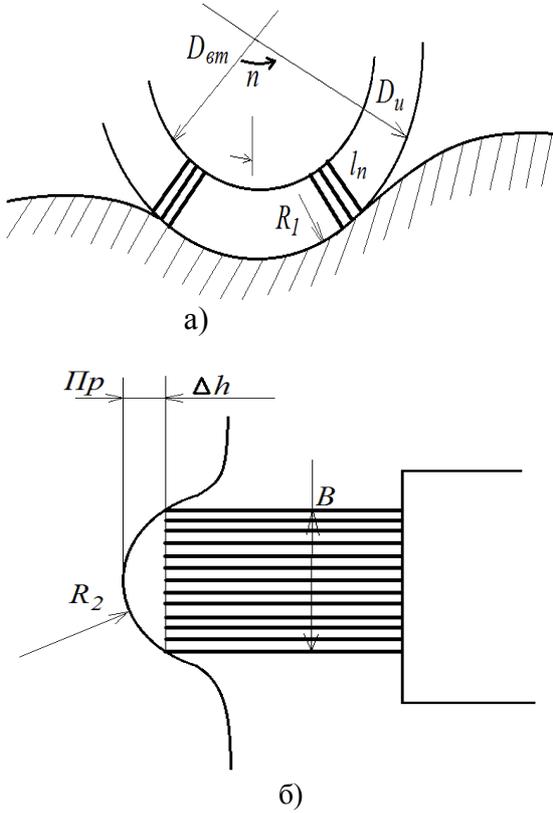


Рис. 1. К расчету габаритных размеров инструмента (а – продольное сечение, б – поперечное сечение), R_1 - изгиб профиля заготовки в направлении подачи инструмента; R_2 - изгиб в поперечном направлении; D_u - диаметр инструмента после изготовления; D_{em} - диаметр втулки; l_n - вылет пучков проволоки в инструменте; n - частота вращения; Pr - прижим проволоки; Δh - глубина неровности

В большинстве случаев пучки имеют круглое сечение. На периферии инструмента минимальный диаметр пучка $D_{n1} = B$.

После закрепления во втулке пучок расширяется, и его диаметр в месте крепления

$$D_{n2} = K_p D_{n1}, \quad (5)$$

где K_p - коэффициент раскрытия пучка ($K_p = 1,1 \div 1,2$ в зависимости от вылета проволоки (l_n) и характеристики ее материала).

С учетом возможности крепления пучков к втулке количество пучков (N_n) по ширине электрода-щеточки (B)

$$N_n \leq \frac{B}{D_{n2}} = \frac{2\sqrt{Pr(2R_2 - Pr)}}{K_p D_{n1}}, \quad (6)$$

где N_n - целое число.

Если заготовка плоская, то ширина может быть любой, и ограничена только силой тока источника питания, величина которого должна быть достаточной для создания требуемой плотности тока (j) в зоне анодного растворения. По [1] $j \geq 18 \div 20$ А/см².

Часть обрабатываемых деталей имеет плоские поверхности, для которых при известном D_u следует найти диаметр пучка D_n . Такой параметр определяет время активного анодного удаления припуска, которое зависит от предельного межэлектродного зазора S_k между наружной поверхностью пучка и обрабатываемым участком заготовки. Тогда участок инструмента, где происходит анодное удаление припуска, может приближенно рассчитываться по формуле:

$$l_{уз} = \sqrt{\left(\frac{D_u}{2} + S_k\right)^2 + \left(\frac{D_u}{2}\right)^2} \quad (7)$$

S_k находится из основного закона анодного растворения [2]

$$S_k = \frac{\chi(U - \Delta U)}{j_{кр}}$$

где χ - электропроводность межэлектродной среды (Ом⁻¹ м⁻¹); U - напряжение на электродах, В; ΔU - потери напряжения, В; $j_{кр}$ - критическая минимальная плотность тока, при которой процесс анодного растворения практически прекращается, $j_{кр} = 1,8 \div 2,0$ А/см².

С учетом (7) активный участок инструмента

$$l_{уз} = \sqrt{\frac{\chi(U - \Delta U)}{j_{кр}} + \left(D_u + \frac{\chi(U - \Delta U)}{j_{кр}}\right)} \quad (8)$$

Для рассматриваемого случая

$$m_n \leq \frac{\pi D_u}{2B+l_{y3}} = \frac{\pi D_u}{2K_p \cdot D_{n1} + \sqrt{\frac{\chi(U-\Delta U)}{j_{kp}} + \left(D_u + \frac{\chi(U-\Delta U)}{j_{kp}} \right)^2}} \quad (16)$$

Расчет предельного количества проволоки в пучке электрода-щетке

Диаметр пучка проволоки щетки:

$$D_{n2} = 2K_p \sqrt{Pr(2R_2 - Pr)} \quad (17)$$

$$n_n = \frac{\pi D_{n2}}{\pi d_2} = 2K_p \frac{\sqrt{Pr(2R_2 - Pr)}}{\sqrt{\frac{K_{od} \cdot I^2 \cdot \mu_l \cdot l_n^2}{S_0^2 E}}} \quad (18)$$

Особенности проектирования электрода-щетке для чистовой обработки

Для увеличения интенсивности съема припуска анодным растворением желательнее иметь минимальный межэлектродный зазор. Если заготовка плоская, то диаметр инструмента должен быть большим и ограничен только возможностями размещения его на станке.

По мере износа пучков диаметр электрода-щетке уменьшается [3], поэтому целесообразно диаметр втулки выбирать наибольшим (с учетом длины рабочей части втулки и возможностей оборудования).

Диаметр пучка желательнее иметь близким к расчетному, т.к. при его уменьшении относительно расчетной величины снижается скорость удаления припуска, а увеличение не дает улучшения технологических показателей, но вызывает повышенный расход энергии, металла на инструмент.

Воронежский государственный технический университет

METHOD OF CALCULATION OF THE TOOL FROM THE UNPROFILED WORKER PART

A.Yu. Ryazantsev, O.N. Kirillov

In work new approach to design of working part of a unprofiled electrode - a brush where rigidity of the processed site and possibility of maintenance of the demanded processing accuracy at a difficult contour of preparation is considered is offered. Influence of a form of preparation on parameters of the unprofiled tool for fair processing of preparations is considered

Key words: electrode - the tool, electrode parameters - brushes, dimensions, a tool step

Пучки должны быть размещены вдоль оси электрода-щетке в один ряд, т.к. наличие пучков между рядами нарушает электрические параметры анодного растворения и параметры импульсов.

Заключение

Разработанная методика проектирования электрода-щетке для чистовой обработки нежестких деталей впервые позволила обосновать выбор оптимальных параметров инструмента, обеспечивающих требуемую точность профиля и качество поверхностного слоя. Это открывает возможность получать электродом-щеткой качественные детали без последующей обработки.

Приведенные особенности проектирования инструмента для чистовой обработки нежестких участков заготовок существенно расширили область эффективного применения электродов-щеток оригинальной конструкции, предложенных учеными Воронежского государственного технического университета.

Литература

1. Кириллов О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом. Воронеж: ВГТУ. 2010. 254 с.
2. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение. 2005. 511 с.
3. Кириллов, О.Н. Механизм контактной комбинированной размерной высокоскоростной обработки непрофилированным электродом [Текст] / О.Н. Кириллов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - Т. 6. - № 9. - С. 91-94.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИКАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ

С.В. Сафонов

В работе рассмотрено моделирование процесса, обоснование метода и возможности проектирования технологии модификации поверхностного слоя и управляемого изменения толщины покрытий, наносимых на металлические детали с целью улучшения эксплуатационных свойств изделий. Выбор способа и технологии производится методом многокритериальной оптимизации процесса на стадии технологической подготовки производства

Ключевые слова: моделирование, способы, технологии, эксплуатационные показатели, модификация, проектирование

Введение

В работе [1] установлено, что проектирование комбинированных технологических процессов, обеспечивающие предельно возможные эксплуатационные показатели изделий, возможно, если научно обоснованно использовать ранее созданные технологии, целенаправленно разрабатывать перспективные методы и средства модификации поверхностного слоя и изменение толщины покрытий с приданием им нужных эксплуатационных характеристик.

В основе проектирования лежит моделирование процессов путем оптимизации, как отдельных воздействий, так и их комплексов.

Моделирование процесса

Разработка модели может выполняться, если обоснованы начальные и конечные условия, определяющие область ее применения для проектирования эффективных технологических процессов, особенно при производстве современной наукоемкой техники (в авиакосмической отрасли, транспортном, специальном машиностроении).

В основу модели положена научная концепция о возможности критериального выбора совместимых воздействий с помощью принципа полезности.

Начальные условия для построения модели:

1. Наличие исследованных методов и средств модификации поверхностного слоя и изменения его толщины для получения требуемых эксплуатационных свойств изделий.

2. Возможность разработки новых технологических процессов модификации и изменения толщины покрытия для оптимизации характеристик изделий в допустимые сроки их создания.

Граничные условия:

1. Предельные показатели эксплуатационных свойств изделий с модифицированным поверхностным слоем.

2. Обоснованность финансовых и временных затрат на создание новых процессов.

3. Возможность и целесообразность использования и приобретения требуемых технологий на стороне.

4. Степень собственной правовой защиты требуемых способов и устройств.

При разработке рассмотрены и использованы следующие научные гипотезы:

- имеющиеся в технике и вновь создаваемые технические воздействия на поверхностный слой деталей из металлических материалов способны значительно повысить эксплуатационные показатели изделий, вплоть до теоретически возможного уровня;

- механизм управляемого сочетания воздействий на материал позволяет спроектировать комбинированные технологические процессы, которые учитывают условия подбора работы имеющихся и вновь создаваемых технологических систем для наиболее полного использования имеющегося потенциала поверхностного слоя материалов;

- имеющиеся и вновь разрабатываемые технологические воздействия на поверхностный слой позволяют усилить положительные эксплуатационные показатели изделий и снизить или устранить негативное влияние на эти показатели.

Сафонов Сергей Владимирович – ВГТУ, канд. пед. наук, профессор, тел. 8(473)246-29-90, e-mail: safonov@vorstu.ru

Научная проблема, решаемая в процессе моделирования процесса модификации и изменения толщины покрытий, содержит научное обоснование и формализацию связей между возможностями технологических воздействий на поверхностный слой и заданными эксплуатационными показателями, формируемыми путем сочетания известных и вновь создаваемых технологических приемов с учетом ограничений по финансовым и временным критериям, специфичным для различных отраслей машиностроения.

Моделирование может выполняться в виде задачи многокритериальной оптимизации с булевыми переменными [2]. Моделирование формируется на критериях, изложенных в [1]. Конечный результат (R) синтеза (i) внешних воздействий на изделие (U).

$$R \subset \otimes \{U_n, n \in \prod_p\}, \quad (1)$$

где \otimes - декартово произведение, $i=0$, \prod_{pi} - множество возможных технологией изменения свойств поверхностного слоя для конкретного изделия;

\prod_p - заданный разработчиком параметр изделия U, где определяющее воздействие оказывает \prod_{pi} , где \prod_{pi} - заданный показатель полезности i -го воздействия; R - результирующий показатель комбинации воздействий; n-количество используемых воздействий.

Технологический процесс может быть задан через множества (m_i)

$$i \subset \otimes \{m_i, i \in m\}, \quad (2)$$

где $i=0$, m - множество внешних воздействий, реализуемых в возможных технологических процессах модификации и покрытий поверхностного слоя; m - количество перспективных реально достигаемых технологических воздействий на поверхностный слой для повышения эксплуатационных показателей изделия

Возможность реализации процесса оценивается

$$\prod_{pi} \subset R \otimes \prod_{oi}, \quad (3)$$

где \prod_{oi} - достигнутый показатель полезности - i -го воздействия при взаимном влиянии воздействий

$$\prod_{oi} = \langle R_i, K_i \rangle, \quad (4)$$

где R_i - коэффициент полезности одного или нескольких внешних воздействий; K_i - коэффициент, характеризующий положительное воздействие на \prod_i ; \overline{K}_i -

коэффициент, отражающий негативное воздействие на процесс (\prod_i).

Механизм проектирования технологического процесса модификации и изменения толщины поверхностного слоя для обеспечения заданных эксплуатационных показателей строится на закономерности

$$\langle R_i, K_{di} \rangle = \arg \text{ext } P \{ \Psi \subset (R, K) \otimes \prod_{di} \} =$$

$$= \prod_{pi}; i \in n, \quad (5)$$

где P - вероятность положительного воздействия факторов ($\overline{K}_{oi}; \overline{K}_{di}$); Ψ_i - функция, характеризующая связь между технологическим воздействием и главным эксплуатационным показателем, зависящем от характеристик поверхностного слоя. Функция (5) определяет выбор воздействий для обеспечения наибольшего уровня полезности

$$T_{di} (i = \overline{1, m}), \text{ где } R_{di} (\overline{1, m}) \quad (6)$$

Моделирование процедуры проектирования технологии выполняется с учетом возможностей достигнутых и достигаемых воздействий в несколько этапов:

1. Определение количества допустимых решений (\overline{R}) с учетом принятых ограничений и начальных условий (\overline{T} - допустимый технологический процесс из совокупности существующих (T).

$$\overline{R} \in R \quad (7)$$

$$\overline{T} \in T \quad (8)$$

2. Сравнительный анализ единичных воздействий

$$\langle \overline{R}_i, \overline{T}_i \rangle \text{ при } \overline{R} \otimes \overline{T} \quad (9)$$

3. Возможность проектирования допустимой технологии (\overline{T}) при комбинированном воздействии несколько факторов.

4. Группирование воздействий допустимых технологий (\overline{T}) при условии $\overline{K}_{di} \rightarrow \max; \overline{K}_{di} \rightarrow \min$.

На первом этапе выполняется формирование групп воздействий $\overline{R} \in R; \overline{T} \in T$, обеспечивающих \prod_0 или \prod_d .

Для конкретного изделия (U) находится минимальный набор технологических воздействий (\overline{T}_i).

Для достигнутых показателей (\prod_{oi})

$$\prod_{oi} = \arg \min \sum_{i=1}^n \delta_{iT}; i = \overline{1, n} \left. \begin{array}{l} \sum_1^n \alpha_{iT}, \delta_{iT} \geq 1; i = \overline{1, n} \end{array} \right\} \quad (10)$$

Для достижимых (\prod_{di})

$$\left. \begin{aligned} \Pi_{di} &= \arg \min \sum_1^m \delta_{iT} ; i = \overline{1, m} \\ \sum_1^n \alpha_{iT} \delta_{iT} &\geq 1; i = \overline{1, m} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Здесь Π_{di} достижимый показатель воздействия; $\alpha_{iT} \delta_{iT}$ булевы переменные, которые определяются по критериям:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{iT} &= \begin{cases} 1, \text{ если } T_i \text{ входит в } \overline{T_i} \in \overline{T}; \\ 0, \text{ если не входит} \end{cases} \\ \alpha_{iT} &= \begin{cases} 1, \text{ если } \overline{T_i} \subset \overline{T} \\ 0 \text{ если не принадлежит} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Оценку воздействий выполняют по зависимостям, приведенным в таблице.

Выбор факторов при проектировании технологий с единичным и комбинированным воздействием

Описание процесса	Вид технологического процесса	
	С главным единичным воздействием	С комбинированным воздействием нескольких факторов
Логические связи	Оценка по главному (генеральному) воздействию	Рассматриваются комбинированные воздействия на заданный эксплуатационный показатель
Формализация связей	$\overline{T}_{di} U_i$ при $i = \overline{1, m}$	$i \in \overline{T}_{di} U_i; i = \overline{1, n}$
Критерий выбора технологий	$i \in (\overline{T}_{d1} U_1 \dots \dots \overline{T}_{dm} U_m)$	$i \in (\overline{T}_{d1} U_1 \dots \dots \overline{T}_{dm} U_m) > > (\overline{T}_{o1} U_1 \dots \dots \overline{T}_{om} U_m)$

На следующем этапе проектирования необходимо обосновать выбор одного главного (генерального) воздействия F.

$$\left. \begin{aligned} (\delta_{in}, \delta_{im}) &= \arg \max P(\Psi_i, \delta_{in}, \delta_{im}) = F_i; i \in n, i \in m \\ U &\subset \arg \min K_{oi} \quad i = \overline{1, n} \\ \sum_1^{Rn} \delta_{in} &= 1; \quad i = \overline{1, n} \\ \sum_1^{Rm} \delta_{im} &= 1; \quad i = \overline{1, m} \\ \Pi_{di} &> \Pi_{oi}(\overline{K}_{di}); \Pi_{oi} > \Pi_{pi} \quad i_{io} = \overline{1, n} \quad i_{pi} = \overline{1, n} \quad i_{di} = 1, m \\ \delta_{in} &= \begin{cases} 1, \text{ если } \Pi_{di}(\overline{K}_{di}) > \Pi_{pi}(\overline{K}_{pi}) \\ 0, \text{ если } \Pi_{oi}(\overline{K}_{oi}) < \Pi_{pi}(\overline{K}_{pi}) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Для комбинированного воздействия (таблица) требуется упорядочивание как известных (n) так и перспективных (m) воздействий по эксплуатационным показателям. Здесь для каждого главного (генерального) показателя может оказаться несколько сочетаний воздействий, где присутствуют как положительные (\overline{K}_i) так и негативные (\overline{K}_i) показатели. После ранжирования воздействий выполняется перебор их комбинаций с учетом ограничений и уровня полезности. После этого формируется технологический процесс для модификации и изменения геометрии поверхностного слоя.

Для оценки результата взаимного воздействия нескольких факторов может быть использована система

$$\left. \begin{aligned} \delta_{in} &= \arg \max \left\{ \Pi_{di} \triangleq \Psi_i [f(\delta_{in})] \right\} \\ \sum_1^n \delta_{in} &= 1, \quad n = \overline{1, n} \\ \sum_1^m \delta_{im} &= 1, \quad m = \overline{1, m} \\ \overline{K}_{di} - \overline{K}_{oi} + n\delta_{in} &\leq n - 1, \quad n = \overline{1, n} \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где Π_{di} – допустимый показатель достижимого уровня воздействия при $\overline{K}_{di} \rightarrow \max, \overline{K}_{di} \rightarrow \min$; Δ – оператор входящих разностей.

Объединение воздействий в группы $n = \overline{1, i}, m = \overline{1, m}$ производится с помощью булевых переменных δ_{in} и δ_{im} .

Если принять, что суммарное воздействие в (14) возможно создать только при отсутствии внутренних преобразований (например, химических реакций), то

$$\left. \begin{aligned} \delta_{im} &= \arg \max \left\{ \Psi_i \overline{K}_{di}(T_{di}) \delta_{im} \right\} \\ \sum_1^m \delta_{im} &= 1, m = \overline{1, m} \quad \Pi_{di}(\overline{K}_{di}) > \Pi_{oi}(\overline{K}_{oi}) \\ \delta_{im} &= 1, \text{ если } \Pi_{di} \subset \Pi_{oi} \\ \delta_{im} &= 0, \text{ если } \Pi_{di} \not\subset \Pi_{oi} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Суммарное воздействие должно как положительное, так и отрицательное влияние проектирующего процесса на эксплуатационные показатели

$$P_{o\Sigma} \subset \sum_1^n P_{oi} (\overline{K_{oi}}) \text{ при } P_{oi} (\overline{K_{oi}}) \rightarrow \min \quad (16)$$

$$P_{d\Sigma} \subset \sum_1^m P_{di} (\overline{K_{di}}) \text{ при } P_{di} (\overline{K_{di}}) \rightarrow \min$$

При разработке методологии проектирования технологических процессов для изменения параметров поверхностного слоя может использоваться несколько структур:

- если имеется необходимость использования только одного воздействия, заданного разработчиком, для получения эксплуатационного показателя P_{pi} .

Здесь решается задача линейного программирования с попарной оценкой $\overline{K_{oi}}$, $\overline{K_{oi}}$ и $\overline{K_{di}}$, $\overline{K_{di}}$, как показано в таблице;

- если имеется суммарное требование к достижению эксплуатационного показателя путем комбинации нескольких независимых технологических воздействий. Здесь проектирование комбинированного процесса выполняется по критериям (15), (16). Оценочным показателем служит критерий

$$P_{di} (\overline{K_{di}}) > P_{pi}, \text{ если } P_{di} > P_{oi} \quad (17)$$

$$P_{oi} (\overline{K_{oi}}) > P_{pi}, \text{ если } P_{di} \leq P_{oi} \quad (18)$$

При этом учитываются ограничения по требуемому времени разработки (при необходимости) нового технологического режима и обоснованности финансовых вложений на разработку (рассматривается в форме ограничений в модели).

- если суммарное эксплуатационное требование может быть реализовано при использовании нескольких физических воздействий, все или часть которых преобразуется в новые воздействия в процессе проведения технологических операций по изменению характеристик поверхностного слоя.

Здесь имеет место многокритериальная задача с минимизацией числа воздействий по зависимостям (10), (11) и вероятностным показателем исполнимости принятого технологического решения "Р".

Реализация системы проектирования техпроцессов совершенствования поверхностного слоя

Построение системы базируется на состоянии имеющихся и перспективных разработок в рассматриваемый период времени и допустимых интервалов до получения требуемых процессов,

включающего достижение конечного результата (период t_R)

$$T_1, \dots, t_R \leq t_0 + t_d,$$

где t_0 - время освоения процессов для получения P_p ; t_d - время, необходимое для разработки наиболее трудоемкого достижимого показателя $\overline{P_{dmax}}$.

Система включает:

- параметрическую адаптацию имеющихся и проектируемых воздействий к их возможностям воздействия на поверхностный слой, обеспечивающих получение заданного (P_p) или перспективного ($\overline{P_{dmax}}$) эксплуатационного показателя;

- структурную адаптацию воздействий к комбинированным технологическим процессам формирования поверхностного слоя;

- параметрическую и структурную адаптацию к ранее используемым технологиям изготовления аналогичных объектов производства. Для заданных (P_p), достигнутых (P_o), достижимых (P_d) эксплуатационных показателей требуется соответственно n и m воздействий. Требуемая система может быть сформирована проектированием технологических процессов (T) при наибольшем воздействии критерия полезности (K).

$$\left. \begin{aligned} &K_{di} (T_1, T_2 \dots T_m); \quad i = \overline{1, m} \\ &\overline{K_{di}}, \quad i = \overline{1, m} \rightarrow \min \\ &\overline{K_{di}}, \quad i = \overline{1, m} \rightarrow \min \\ &P_{di} \subset P_{oi} \subset P_{pi} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Проектирование осуществляется в несколько этапов, которые включают:

- детализацию требуемых (заданных) эксплуатационных показателей и оценку уровня значимости каждого параметра с учетом возможности использования достигнутых воздействий;

- далее по критериям (5), (6) формализуют реальные связи между заданными, достигнутыми и достижимыми показателями и ограничивают множество внешних воздействий (n, m) граничными условиями, заданными, как правило, разработчиком. При необходимости детализируют воздействия до выявления главного векторного критерия полезности;

- для выбранных критериев полезности устанавливают диапазон возможных воздействий и показателей. Разрабатывают возможные сочетания воздействий для формирования вариантов комбинированных процессов, из которых назначают рабочий, учитывающий имеющиеся ограничения;

- детализируют процессы, учитывающие принятые воздействия, проводят их анализ на соответствие критерию $\prod_o(\vec{K}_{oi}) \rightarrow \max$. Принимают решение о технологической подготовке производства для использования технологий, включающих достигнутые показатели полезности;

- затем обосновывается целесообразность создания новых процессов, учитывающих воздействие при условиях $\prod_{di}(\vec{K}_{di}) \rightarrow \max$; $\prod_{di}(\vec{K}_{di}) \rightarrow \min$. Здесь используется принцип подобия технических систем, подробно рассмотренный в [3];

- создается программное и информационное обеспечение имеющихся и проектируемых технологических процессов, применяемых для формирования поверхностного слоя с требуемыми эксплуатационными показателями.

Заключение

Моделирование процессов, обеспечивающих формирование поверхностного слоя, необходимого для повышения эксплуатационных свойств изделий, может быть выполнено на базе булевых переменных, открывающих возможность объективно устанавливать связи между параметрами технологических процессов и эксплуатационными показателями, в которых количественные

оценки выполняются по предложенным в работе критериям полезности.

Приведенная в статье обобщенная модель реализует предложенные принципы и отражает методологию проектирования технологических процессов с использованием как известных, так и вновь создаваемых технологических воздействий на поверхностные слои с прогнозированием достижения возможных и перспективных эксплуатационных показателей. Это представляет интерес для технологического обеспечения создаваемых конкурентоспособных изделий новых поколений наукоемких изделий машиностроения, особенно транспортной техники.

Обоснованные в работе начальные и граничные условия, рабочие гипотезы позволяют ускорить продуктивный поиск способов воздействий, проектирование, отработку и внедрение новых технологических процессов для формирования поверхностного слоя металлических изделий, эксплуатируемые в напряженных условиях, в том числе в агрессивных и криогенных средах.

Литература

1. Сафонов, С.В. Повышение эксплуатационных характеристик деталей путем модификации поверхностного слоя [Текст] / С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, А.И. Портных // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: монография: в 5 т.; под ред. А.В. Киричека. – М.: Изд. дом «Спектр», 2014. – Т.3. – 416 с.
2. Меткин, Н.П. Технологическая подготовка гибких автоматизированных сборочно-монтажных производств в приборостроении [Текст] / Н.П. Меткин и др. – Л.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
3. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения [Текст] / В.Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.

Воронежский государственный технический университет

MODELLING THE PROCESS OF COATING THICKNESS MODIFICATION AND VARIATION

S.V. Safonov

The paper considers the process modelling and the rationale for the method and possibilities of planning the technology of surface layer modification and controlled thickness variation in coatings, deposited onto metal parts for enhancing the performance parameters of products. The methods and technologies are selected by the method of multicriterial process optimization, at the stage of production engineering

Key words: modelling, methods, technologies, performance parameters, modification, planning

МЕХАНИЗМ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДОМ - ЩЁТКОЙ

А.Ю. Рязанцев, О.Н. Кириллов

В статье рассмотрен механизм удаления припуска электродом-щёткой при комбинированной чистовой обработке деталей с ограниченной жёсткостью. Теоретически обоснованы силовые воздействия на обрабатываемую заготовку, что позволяет управлять режимами обработки, обеспечивающими требуемую точность обработки в зависимости от жесткости профиля детали в зоне обработки. Раскрыта специфика применения инструмента при чистовой обработке деталей с ограниченной жесткостью

Ключевые слова: комбинированная обработка, механизм процесса, электрод-щётка, чистовая обработка, ограниченная жесткость

Чистовая размерная обработка металлических заготовок успешно выполняется шлифованием абразивным инструментом, где его профиль дискретно переносится на поверхность детали. Однако, с усложнением обрабатываемых объектов и снижением их металлоёмкости уменьшается жёсткость заготовки и силовые воздействия инструмента вносят погрешности геометрической формы, снижая возможности по достижению высотой точности. Это, особо, проявляется при изготовлении изделий для летательных аппаратов, где с целью облегчения конструкции широко применяют ажурные детали с малой жёсткостью.

Появившиеся в последние годы инструменты с непрофилированной и изменяемой, в процессе обработки, рабочей частью позволили выполнять чистовую обработку нежёстких деталей со сложным профилем. К таким инструментам относится металлическая электрод – щётка, которая успешно применяется для безразмерной обработки сложноконтурных поверхностей.

Проведённые исследования показали, что возможно расширить область использования технологии и инструмента на размерную, чистовую обработку труднообрабатываемых сплавов, применяемых для сложноконтурных изделий малой жёсткости, путём поддержания требуемого прижима пучков проволоки в электроде – щётке и совмещения электрических режимов процесса с параметрами инструмента. Это обеспечивает стабилизацию процесса, повышение технологических показателей и позволяет освоить высокопроизводительную чистовую обработку изделий с минимальной металлоёмкостью. Подобная задача решается впервые и её

результаты способствуют созданию изделий новых поколений техники, что актуально для машиностроения.

В основу исследований механизма положены научные гипотезы:

1. Диаметр проволоки электрода-щётки определяется не только из условия получения за счёт центробежных сил радиального положения при обработке, но и сохранения устойчивости от действия сил разряда при подходе её к месту контакта с заготовкой.

2. Количество проволоки в пучке определяет закономерности съёма материала с заготовки и необходима, научно обоснованная, методика расчёта этого параметра электрода – щётки.

3. Электрические режимы обработки зависят от геометрических параметров электрода – щётки и должны назначаться в зависимости от формы и жёсткости поверхности обработки заготовки для обеспечения стабильной величины прижима пучков проволоки к заготовке.

4. Деионизация межэлектродного пространства при высокоскоростном вращении электрода – щётки обеспечивает возможность за период сближения пучка с зоной обработки получение количества разрядов, близкого к числу проволоки в пучке, что позволяет установить суммарную силу воздействия разряда на электроды.

5. За счёт центробежных сил, при достаточной окружной скорости электрода – щётки, проволока принимает положение, близкое к радиальному и при продольном воздействии на неё силы импульса разряда не может возникнуть многократного поперечного изгиба по её длине.

6. Принятая в ранее выполненных работах методика поддержания величины прижима, по постоянству технологического тока не может обеспечить стабильности протекания процесса. Из-за изменения, за счёт изгиба площади кон-

Рязанцев Александр Юрьевич - ВГТУ, аспирант, e-mail: ryazantsev86@rambler.ru

Кириллов Олег Николаевич - ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

такта пучков проволоки, с заготовкой и требуется новый способ управления прижимом.

Взаимодействие инструмента с зоной обработки заготовки.

Обработка электродом-щеткой включает несколько видов воздействий:

1. Силу от импульса разряда в момент подхода пучка к зоне обработки (рис.1).

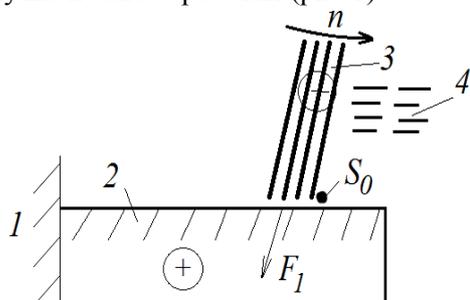


Рис. 1. Процесс начала обработки пучком проволоки в жидкой рабочей среде 4, S_0 - зазор между электродами в момент набегания проволоки 3 на заготовку 2 и начала разряда, F_1 - сила, возникающая в момент разряда

Ограничением этого этапа является размер пучка и шаг между пучками, где необходимо, чтобы первый пучок полностью вышел из зоны обработки до того, как возникнет касание заготовки следующим пучком. При этом размер сечения (диаметр) пучка должен быть минимальным.

2. Очистку зоны обработки концами проволоки (рис.2), где касание обеспечивается сближением концов проволоки с заготовкой на величину как минимум гарантированного прижима $Pr_{г}$.

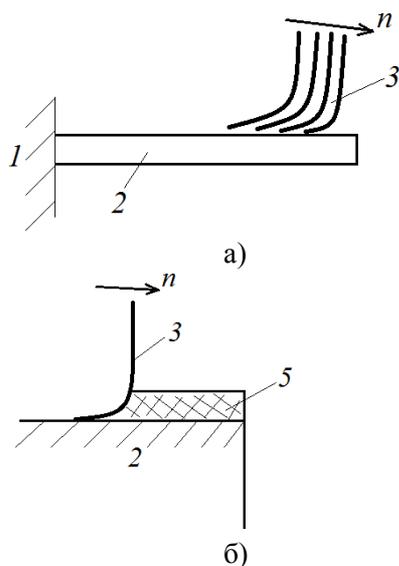


Рис. 2. Зачистка поверхности заготовки механическим воздействием концов проволоки (3), 5 – окислы, пленки и другие материалы на поверхности обрабатываемой детали, а – схема зачистки, б – удаление загрязнений

Такой этап позволяет подготовить поверхность к анодному удалению припуска после выхода пучка из зоны обработки

Отсюда следуют технологические рекомендации по выбору прижима (не менее $Pr_{г}$, но не более касания боковой поверхностью изогнутой проволоки обрабатываемой поверхности). Как правило, для рассчитанного инструмента прижим $Pr=0,2\div 0,6$ мм. Кроме того, для обеспечения требуемой для анодного процесса скорости прокатки рабочей среды ($V_{p.c.}$ на рис.3) необходимо, чтобы концы пучков механически прокатывали и ускоряли течение рабочей среды, поэтому вращение электрода-щеточки назначать по направлению, обратному подаче инструмента.

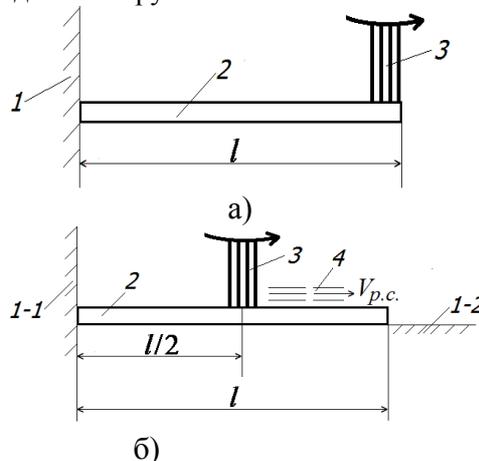


Рис. 3. Схема обработки участка детали с постоянным сечением профиля; а – консольный участок с зашпеленным концом; б – участок с концевыми опорами 1(1-1 – зашпеленный конец); 2 – деталь; 3 – электрод – щетка; 1-2 – опора для детали; 4 – рабочая среда; $V_{p.c.}$ - скорость прокатки рабочей среды; l - длина участка с нежесткой геометрией

3. Происходит съем (рис.4) припуска Z за счет анодного растворения материала

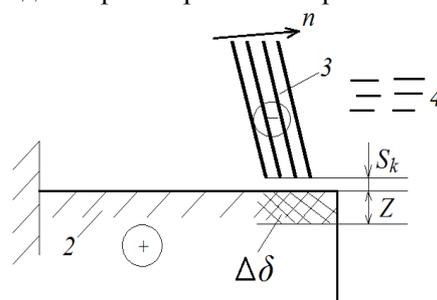


Рис. 4. Анодное растворение припуска при выходе пучка проволоки 3 из зоны обработки; S_k - межэлектродный зазор в конце анодного удаления припуска, $\Delta\delta$ - припуск (Z), удаляемый анодным растворением

Припуск за один оборот электрода-щетki (Z_0) можно рассчитать по формуле

$$Z_0 = k_0 Z_1 n_0, \quad (1)$$

где k_0 - коэффициент, учитывающий долю съема припуска за счет анодного растворения в момент подхода пучка к заготовке ($k_0 = 1,5 \div 1,6$);

Z_1 - съем материала за счет электроэрозионного удаления припуска единичным пучком;

n_0 - количество пучков в электроде-щетке.

4. Кроме рассмотренных воздействий импульса, механической зачистки, анодного растворения, имеет место импульсное воздействие за счет удара концов проволоки в момент ее соприкосновения с заготовкой после разряда (рис.5, рис.6).

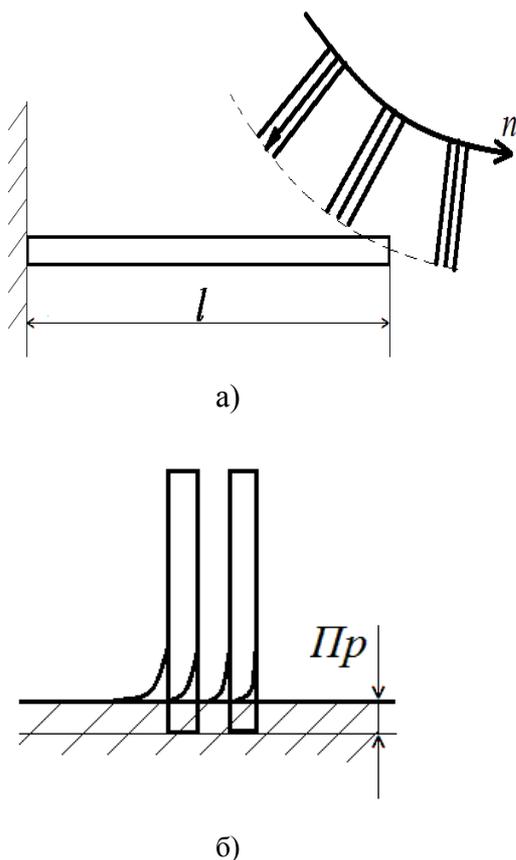


Рис. 5. Прижим проволоки (Pr) при жесткой детали (n - частота вращения электрода-щетki; l -длина консольной части заготовки): а - схема набегания проволоки; б - положение концов проволоки в зоне обработки

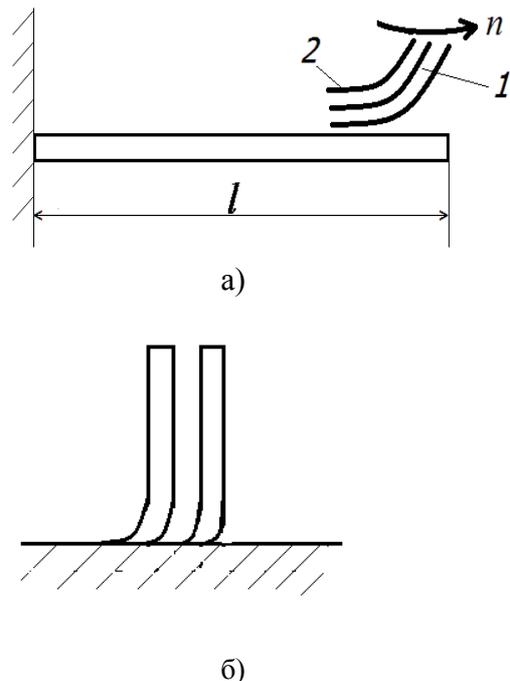


Рис. 6. Положение нежесткой проволоки в пучке при обработке деталей малой жесткости с прижимом проволоки к заготовке: а - при малой окружной скорости; б - при выпрямленной проволоке (1) за счет центробежных сил, 2 - изгиб концов проволоки

При достаточной жесткости пучка проволоки (например за счет центробежных сил) прижим концов проволоки (Pr на рис.5) может быть равным снимаемому припуску Z и в конце обработки (чистовой этап формообразования) величина прижима будет выбираться по значению припуска.

Нежесткая заготовка (или ее участки) (рис.6) под действием силы разряда (как правило, всего пучка) может вызвать изгиб проволоки и всего пучка (рис.7) с радиусом r , что может превысить величину прижима, вызвать автоколебания и нарушить процесс обработки электродом-щеткой.

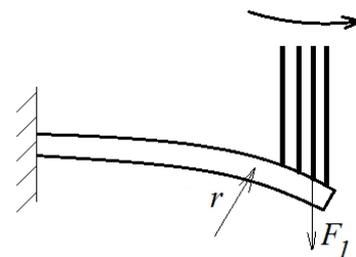


Рис. 7. Схема обработки нежесткой детали; r - радиус изгиба нежесткой детали за счет импульсных разрядов с силой F_1

Величина изгиба зависит от схемы установки участка заготовки: при наличии опоры 1-2 (рис.3, б) наибольший прогиб будет при расположении инструмента на середине участка ($l/2$).

При расчете прижима может учитываться несколько вариантов базирования заготовки в зоне обработки:

1. За счет замены в электроде-щетке пучков проволоки на более мягкие и смягчения режимов уменьшить силу F_1 (рис.7) до величины, при которой деталь не изгибается, и в силу этого прижим остается стабильным в течение всего срока обработки.
2. Введением дополнительных опор типа, приведенных на рис.3.
3. Поворотом детали в положение, показанное на рис.8.

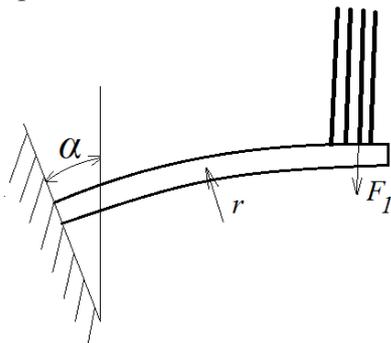


Рис. 8. Обработка участка нежесткой детали при прижимах и силе F_1 , вызывающих ее изгиб радиусом r , α - угол поворота места обработки заготовки для выравнивания прижима пучка к заготовке

Как видно из рис.8 стрела прогиба становится вертикальной, а ее величина может не превышать размера прижима.

4. Изменением траектории перемещения оси электрода - щетки параллельно контуру зоны обработки заготовки с поддержанием постоянства прижима, что обеспечивает стабилизацию процесса снятия припуска и точность, требуемую для чистовой обработки. Этот вариант не нашел практического использования из-за высокой сложности управления процессом и отсутствия оборудования для его реализации. Но его следует рассмотреть как перспективный при чистовой обработке деталей электродом-щеткой с учетом возможности изменения геометрии поверхности за счет изгиба и крутильных воздействий. Такой вариант был рассмотрен соискателем и учеными Воронежской научной школы на уровне изобретений новых способов и устройств.

Сила F_0 , действующая на обрабатываемую поверхность заготовки, включает силу разряда пучка (F_1) и силу воздействия концов проволоки в малых соприкосновениях с зоной обработки за счет наличия прижима (F_2)

$$F_0 = F_1 + F_2 \quad (2)$$

По [1] сила F_1 зависит от напряженности магнитного поля и магнитной постоянной рабочей среды (μ_c) в межэлектродном зазоре (S_0) (рис.1)

$$F_1 = k\phi \left(\frac{I}{S_0} \right)^2 \mu_c d_n^2 n_n, \quad (3)$$

где k_ϕ - размерный коэффициент, учитывающий условия формирования импульса (характеристики инструмента, режимы и др.);

I_1 - максимальная сила тока в импульсе на единичную проволоку, А; μ_c - магнитная постоянная (Гн/мм). Зависит от состава рабочей среды, геометрии электродов и других факторов. Для воздушной среды по [1] магнитная постоянная составляет $4\pi \times 10^7$ Гн/м

n_n - количество проволоки в пучке.

При чистовой обработке главным требованием становится получение качественной поверхности, поэтому выбирают для пучка мягкую проволоку малого диаметра. При этом, строго оценивая процесс разряда, следует указать, что импульсное воздействие на проволоку в момент подхода ее к заготовке смягчает удар. Величина силы удара (F_2) становится незначительной и может не учитываться в расчетах.

Сила F_1 , действующая на проволоку (рис.1), зависит от ее характеристик и ограничена устойчивостью проволоки, которая может быть рассчитана по [2] с использованием формулы Эйлера, где критическое значение силы $F_{кр1}$

$$F_{кр1} = \eta_y \frac{EI_{\min_n}}{l_n^2}, \quad (4)$$

где η_y - коэффициент устойчивости проволоки. Для выбранной схемы действия сил разряда по [2] $\eta_y = 2,4$;

E - модуль продольной упругости, МПа;

I_{\min_n} - осевой момент инерции поперечного сечения проволоки.

l_n - длина вылета пучка проволоки, мм

При изгибе с кручением пучка при обработке поверхности с неравномерным припуском

$$I_{\min_n} = \frac{\pi d_n^4}{32} \approx 0,1 d_n^4 \quad (5)$$

Тогда критическая сила, действующая на пучок составляет

$$F_{кр} = 0,24 \frac{Ed_n^4}{l_n^2} n_n \quad (6)$$

Для поддержания расчетной величины прижима Pr (рис.5) следует соблюдать условие

$$F_1 \leq F_{кр} \quad (7)$$

При нежесткой детали при постоянном сечении ($a \times b$) места обработки заготовки угол поворота (α) в момент действия силы разряда на периферии пучка проволоки (l_n) электрода-щеточки составляет [2] (рис.8)

$$\alpha = \frac{F_1 l_n^2}{2EJ_3}, \quad (8)$$

где J_3 - момент инерции при изгибе заготовки, определяется через геометрические размеры сечения.

Более сложные формы нежестких заготовок рассматриваются в справочной и научной литературе, в том числе в [3;4].

Особенности работы инструмента при чистовой обработке деталей с ограниченной жесткостью

Электрод-щеточка является инструментом с непрофилированной рабочей поверхностью, которая в определенных пределах повторяет форму обрабатываемого участка. Однако размерная чистовая обработка таким инструментом требует создания его рабочей части с учетом геометрии заготовки под чистовую обработку и возможностей оборудования (например, по угловой частоте вращения шпинделя и наличию узлов автоматического поддержания величины прижима).

В производстве чаще применяют базирование заготовок (в том числе деталей нежесткой конструкции), при котором возможно удалить припуск без изменения положения зоны обработки. Но для этого необходимо, чтобы инструмент был рассчитан под определенный вид изделий, а окончательные условия обработки обеспечиваются путем выбора технологических режимов (электрических, механических, гидравлических параметров процесса).

Заключение

Разработанный механизм и его математическое описание позволяют научно обосновать параметры инструмента (электрода-щеточки), создать методику проектирования технологического процесса чистовой обработки деталей различной жесткости и сложности геометрического профиля, раскрыть возможности применения разработанного метода для изготовления изделий, работающих при различных условиях эксплуатации, включая объекты авиационно-космической техники.

Литература

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов в 2-х томах. Т.2 / под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. 208 с.
2. Справочник металлиста в 5-ти томах. Т.1 / под ред. С.А. Чернавского, В.Ф. Решикова. М.: Машиностроение, 1976. 768 с.
3. Часовских А.И., Управление производством при чрезвычайных обстоятельствах /А.И. Часовских, В.П. Смоленцев, В.В. Агеев.- Воронеж: ВГТУ, 1999. 150с.
4. Кириллов, О.Н. Механизм контактной комбинированной размерной высокоскоростной обработки непрофилированным электродом [Текст] / О.Н. Кириллов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. - Т. 6. - № 9. - С. 91-94.

Воронежский государственный технический университет

MECHANISM OF FAIR PROCESSING BY THE ELECTRODE BRUSH

A.Yu. Ryazantsev, O.N. Kirillov

In article the mechanism of removal of an allowance is considered by an electrode brush at the combined fair processing of details with limited rigidity. Power impacts on the processed preparation that allows to operate the processing modes providing the demanded processing accuracy depending on rigidity of a profile of a detail in a processing zone are theoretically proved. Specifics of use of the tool at fair processing of details with limited rigidity are opened

Key words: the combined processing, the process mechanism, electrode brush, fair processing, limited rigidity

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ГРАФЕ

С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов

Оптимизация дифференциальных систем в банаховом пространстве, состояние которой определяется как слабое решение начально-краевой задачи для параболического уравнения с распределенными параметрами на графе, – новое направление в анализе процессов, описываемых эволюционными уравнениями на сетях. В работе получены необходимые и достаточные условия оптимума для ситуации, обусловленной фиксированным запаздыванием пространственной переменной. При этом указаны пути исследования более общих задач с распределенными параметрами на сетеподобных областях

Ключевые слова: дифференциальная система в банаховом пространстве, запаздывание, распределенные параметры на графе, задача оптимизации

1. Введение. В работе рассматриваются вопросы оптимизации дифференциальной системы в банаховом пространстве, состояние которой определяется как слабое решение начально-краевой задачи для параболического уравнения с распределенными параметрами на графе. На этой базе рассмотрены задачи оптимизации с запаздыванием, получены условия существования единственного оптимума и соотношения, характеризующие этот оптимум, а также описываются приемы, позволяющие установить свойство управляемости указанной системы. Все рассуждения используют произвольный связный ограниченный ориентированный граф, допускающий наличие циклов. Работа продолжает исследования, результаты которых приведены в публикациях [1 – 6].

2. Основные понятия и предложения. Используется произвольный связный ограниченный ориентированный граф, допускающий наличие циклов, при этом сохраняются ставшими классическими обозначения, принятые в работах А.С. Волковой, Ю.А. Гнилицкой и В.В. Провоторова [7 – 9] (см. также [10, 11]). Обозначим через $\partial\Gamma$ множество граничных узлов ζ , $J(\Gamma)$ – множество внутренних ξ узлов графа Γ и пусть Γ_0 – объединение всех ребер, не содержащих концевых точек, $\partial\mathcal{R}$ – множество всех граничных ребер (ребер, содержащих граничные узлы $\zeta \in \partial\Gamma$); $\Gamma_T = \Gamma_0 \times (0, T)$ ($\Gamma_t = \Gamma_0 \times (0, t)$), $\partial\Gamma_T = \partial\Gamma \times (0, T)$ ($\partial\Gamma_t = \partial\Gamma \times (0, t)$). Каждое ребро γ графа Γ

ориентировано, параметризуется отрезком $[0, 1]$ и переменной $x \in [0, 1]$.

Введем необходимые пространства. Через $L_p(\Gamma)$ ($p = 1, 2$) обозначим банахово пространство измеримых на Γ_0 функций с конечной нормой

$$\|u\|_{L_p(\Gamma)} = \left(\int_{\Gamma} u^p(x) dx \right)^{1/p}$$

(аналогично определяются пространства $L_p(\Gamma_T)$, $p = 1, 2$); $W_2^1(\Gamma)$ – пространство функций из $L_2(\Gamma)$, имеющих обобщенную производную 1-го порядка также из $L_2(\Gamma)$, норма в $W_2^1(\Gamma)$ устанавливается соотношением

$$\|u\|_{W_2^1(\Gamma)} = \int_{\Gamma} \left(u(x)^2 + \frac{du(x)^2}{dx} \right) dx;$$

$L_{2,1}(\Gamma_T)$ – пространство функций из $L_1(\Gamma_T)$ с нормой

$$\|u\|_{L_{2,1}(\Gamma_T)} = \int_0^T \left(\int_{\Gamma} u^2(x, t) dx \right)^{1/2} dt;$$

$W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ – пространство функций $u(x, t)$ из $L_2(\Gamma_T)$, имеющих обобщенную производную 1-го порядка по x , принадлежащую $L_2(\Gamma_T)$, норма в $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ вычисляется соотношением

$$\|u\|_{W_2^{1,0}(\Gamma_T)}^2 = \int_{\Gamma_T} \left(u(x, t)^2 + \frac{\partial u(x, t)^2}{\partial x} \right) dx dt.$$

Пусть далее $V_2(\Gamma_T)$ – множество всех функций $u(x, t) \in W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ с конечной нормой

$$\|u\|_{V_2(\Gamma_T)} = \max_{0 \leq t \leq T} \|u(x, t)\|_{L_2(\Gamma)} + \left\| \frac{\partial u}{\partial x} \right\|_{L_2(\Gamma_T)}, \quad (1)$$

Подвальный Семён Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 243-77-18

Провоторов Вячеслав Васильевич – ВГУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: wwprov@mail.ru

сильно непрерывные по t в норме $L_2(\Gamma)$, т. е. такие, что $\|u(x, t + \Delta t) - u(x, t)\|_{L_2(\Gamma)} \rightarrow 0$ при $\Delta t \rightarrow 0$ равномерно на $[0, T]$.

Рассмотрим билинейную форму

$$\begin{aligned} \ell(\mu, \nu) &= \\ &= \int_{\Gamma} \left(a(x) \frac{d\mu(x)}{dx} \frac{d\nu(x)}{dx} + b(x)\mu(x)\nu(x) \right) dx, \end{aligned} \quad (2)$$

коэффициенты $a(x)$, $b(x)$ в (2) – фиксированные измеримые ограниченные на Γ_0 функции. Из леммы 2 [10] следует, что в пространстве $W_2^1(\Gamma)$ есть множество Ω функций $u(x) \in C(\Gamma)$ ($C(\Gamma)$ – пространство непрерывных на Γ функций), удовлетворяющих соотношениям

$$\sum_{\gamma_j \in R(\xi)} a(1)_{\gamma_j} \frac{du(1)_{\gamma_j}}{dx} = \sum_{\gamma_j \in r(\xi)} a(0)_{\gamma_j} \frac{du(0)_{\gamma_j}}{dx}$$

во всех узлах $\xi \in J(\Gamma)$ (здесь $R(\xi)$ – множество ребер, ориентированных «к узлу ξ », $r(\xi)$ – множество ребер ориентированных «от узла ξ »; через $u(\cdot)_{\gamma}$ обозначено сужение функции $u(\cdot)$ на ребро γ). Замыкание в норме $W_2^1(\Gamma)$ множества функций из Ω обозначим через $W_2^1(a, \Gamma)$.

Пусть далее $\Omega_1(a, \Gamma_T)$ – множество функций $u(x, t) \in V_2(\Gamma_T)$, чьи следы определены на сечениях области Γ_T плоскостью $t = t_0$ ($t_0 \in [0, T]$) как функции класса $W_2^1(a, \Gamma)$ и удовлетворяют соотношениям

$$\sum_{\gamma_j \in R(\xi)} a(1)_{\gamma_j} \frac{\partial u(1, t)_{\gamma_j}}{\partial x} = \sum_{\gamma_j \in r(\xi)} a(0)_{\gamma_j} \frac{\partial u(0, t)_{\gamma_j}}{\partial x} \quad (3)$$

для всех узлов $\xi \in J(\Gamma)$. Замыкание множества $\Omega_1(a, \Gamma_T)$ по норме (1) обозначим через $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T) \subset W_2^{1,0}(\Gamma_T)$. Другим подпространством пространства $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ является $W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ – замыкание в норме $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ множества гладких функций, удовлетворяющих соотношениям (3) для всех узлов $\xi \in J(\Gamma)$ и для любого $t \in (0, T)$; аналогично определяется пространство $W_2^1(a, \Gamma_T)$.

Отличим элементов пространства $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ от элементов $W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ является отсутствие у последних непрерывности по переменной t ,

соотношение (3) имеет место почти всюду на $(0, T)$. По мере необходимости будут введены другие пространства и их подпространства с интересующими нас свойствами.

Далее рассмотрим эволюционную задачу без запаздывания с распределенными параметрами на графе Γ и соответствующую ей задачу оптимизации в пространстве $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

3. Оптимизация параболической системы без запаздывания. Рассмотрим начально-краевую задачу (трактовка, используемая в работе [7])

$$\begin{aligned} \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right) + \\ + b(x)y(x, t) = f(x, t), \end{aligned} \quad (4)$$

$$y|_{t=0} = \varphi(x), x \in \Gamma,$$

$$a(x) \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{\Gamma_T} = \nu(x, t) \quad (5)$$

отыскания решения $y(x, t)$ в области Γ_T , удовлетворяющего условиям (1); $f(x, t) \in L_{2,1}(\Gamma_T)$, $\varphi(x) \in L_2(\Gamma)$; $\nu(x, t) \in L_2(\partial\Gamma_T)$.

Определение 1. (см. [2 – 6], а также [7]) Слабым решением начально-краевой задачи (4), (5) называется функция $y(x, t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$, удовлетворяющая интегральному тождеству

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} y(x, t) \eta(x, t) dx - \\ - \int_{\Gamma_t} y(x, t) \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} dx dt + \ell_t(y, \eta) = \\ = \int_{\Gamma} \varphi(x) \eta(x, 0) dx + \int_{\partial\Gamma_T} \nu(x, t) \eta(x, t) dx dt + \\ + \int_{\Gamma_t} f(x, t) \eta(x, t) dx dt \end{aligned} \quad (6)$$

для любой $\eta(x, t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$ и при любом $t \in [0, T]$; $\ell_t(y, \eta)$ – билинейная форма, определяемая соотношением

$$\begin{aligned} \ell_t(y, \eta) = \\ = \int_{\Gamma_t} \left(a(x) \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial x} + b(x)y(x, t)\eta(x, t) \right) dx dt. \end{aligned}$$

Теорема 1. Задача (4), (5) при $\nu \in L_2(\partial\Gamma_T)$ однозначно разрешима в $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$, имеет место

непрерывность линейного отображения $v \rightarrow y(v)$ пространства $L_2(\partial\Gamma_T)$ в $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Доказательство теоремы почти дословно повторяет доказательство, приведенное в [5].

Для определенности рассмотрим задачу граничной оптимизации системы (4) с функцией воздействия $v(x, t)$ во втором соотношении (5). Другие оптимизационные задачи, например, задача стартовой оптимизации [2, 3] или задача распределенной оптимизации [6], формулируются аналогично.

Пусть $\mathbb{U} = L_2(\partial\Gamma_T)$ (пространство граничных воздействий). Функция $y(x, t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ (состояние системы) (4), определяемое как слабое решение задачи (4), (5), очевидно, зависит от $v(x, t)$, поэтому всюду ниже обозначение $y(x, t)$ будет заменено на $y(v)(x, t)$. Пусть наблюдение имеет вид $Cy(v) = y(v)|_{\partial\Gamma_T}$, где $C: L_2(\Gamma_T) \rightarrow L_2(\Gamma_T)$ – линейный непрерывный оператор (оператор граничного наблюдения), $y(v)|_{\partial\Gamma_T}$ – след функции $y(v)$ на поверхности $\partial\Gamma_T$ (если $\partial\Gamma_T$ заменить на подмножество $S \subset \partial\Gamma_T$, то наблюдаются значения функции $y(v)$ на части S поверхности $\partial\Gamma_T$). Пусть далее $N: \mathbb{U} \rightarrow \mathbb{U}$ – линейный непрерывный эрмитов оператор, $(Nv, v)_{\mathbb{U}} \geq \varsigma \|v\|_{\mathbb{U}}^2$ ($\varsigma > 0$ – фиксированная постоянная); $J(v)$ – функционал, требующий минимизации на выпуклом замкнутом множестве $\mathbb{U}_\circ \subset \mathbb{U}$ (в приложениях – функция стоимости):

$$J(v) = \|Cy(v) - z_0\|_{L_2(\partial\Gamma_T)}^2 + (Nv, v)_{\mathbb{U}},$$

где $z_0(x, t) \in L_2(\partial\Gamma_T)$ – заданное наблюдение.

Задача оптимизации системы (4) заключается в том, чтобы отыскать $\inf_{v \in \mathbb{U}_\circ} J(v)$.

Элемент $v(x, t)$, на котором определяется инфимум функционала $J(v)$, назовем оптимумом.

4. Соотношения, характеризующие оптимум. Предварительно приведем утверждение, основанное на теории минимизации коэрцитивных форм [11, с. 13].

Теорема 2 [7]. *Задача оптимизации системы (4) имеет единственный оптимум, если оператор N ненулевой. Для того чтобы элемент $u(x, t) \in \mathbb{U}_\circ$ был единственным оптимумом, необходимо и достаточно, чтобы удовлетворялись следующие соотношения:*

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} y(u)(x, t) \eta(x, t) dx - \\ & - \int_{\Gamma_t} y(u)(x, t) \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} dx dt + \ell_t(y(u), \eta) = \\ & = \int_{\Gamma} \varphi(x) \eta(x, 0) dx + \int_{\partial\Gamma_T} u(x, t) \eta(x, t) dx dt + \\ & + \int_{\Gamma_t} f(x, t) \eta(x, t) dx dt \end{aligned} \quad (7)$$

для любых функций $\eta(x, t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$ и при любом $t \in [0, T]$,

$$\begin{aligned} & \int_{\partial\Gamma_T} (Cy(v)(x, t) - z_0(x, t)) \times \\ & \times C(y(v)(x, t) - y(u)(x, t)) dx dt + \\ & + (Nu, v - u)_{\mathbb{U}} \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

для любых $v \in \mathbb{U}_\circ$; здесь $y(u) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Неравенство (8) можно преобразовать с помощью сопряженного состояния системы (4), учитывая симметричность формы $\ell_t(\mu, \eta)$ ($t \in [0, T]$). Сделаем это только для случая $C: L_2(\partial\Gamma_T) \rightarrow L_2(\partial\Gamma_T)$, тогда неравенство (8) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} & (C^*(Cy(u) - z_0), y(v) - y(u))_{L_2(\partial\Gamma_T)} + \\ & + (Nu, v - u)_{\mathbb{U}} \geq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

для любых $v \in \mathbb{U}_\circ$ (здесь $C^*: L_2(\Gamma_T) \rightarrow L_2(\Gamma_T)$ – сопряженный к C оператор).

Для внешнего воздействия $v(x, t)$ сопряженное состояние $\omega(v)(x, t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$, $\omega(v)(x, T) = 0$, определим соотношением

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(v)(x, t)}{\partial t} \zeta(x, t) dx dt + \ell_T(\omega(v), \zeta) = \\ & = \int_{\Gamma_T} C^*(Cy(v)(x, t) - z_0(x, t)) \zeta(x, t) dx dt \end{aligned} \quad (10)$$

для любых функций $\zeta(x, t) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Пусть функция $y(v)(x, t)$ удовлетворяет тождеству (6), а $y(u)(x, t)$ – тождеству (6) при $v = u$. Положим в (10) $v = u$ и $\zeta(x, t) = y(v)(x, t) - y(u)(x, t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ (последнее возможно, так как $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$), получим

$$\begin{aligned}
& - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(u)(x,t)}{\partial t} (y(v)(x,t) - y(u)(x,t)) dxdt + \\
& + \ell_T(\omega(u), y(v) - y(u)) = \\
& = \int_{\partial \Gamma_T} C^* (Cy(u)(x,t) - z_0(x,t)) \times \\
& \times (y(v)(x,t) - y(u)(x,t)) dxdt.
\end{aligned} \tag{11}$$

С другой стороны, из соотношения (6) вычтем соотношение (7) и, заменив $\eta(x,t)$ на $\omega(u)(x,t)$, получим при $t = T$ соотношение

$$\begin{aligned}
& - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(u)(x,t)}{\partial t} (y(v)(x,t) - y(u)(x,t)) dxdt + \\
& + \ell_T(y(v) - y(u), \omega(u)) = \\
& = \int_{\partial \Gamma_T} (v(x,t) - u(x,t)) \omega(u)(x,t) dxdt.
\end{aligned} \tag{12}$$

Сравнивая в (11) и (12) стоящие справа выражения и учитывая симметричность формы $\ell_T(\cdot, \cdot)$, приходим к равенству

$$\begin{aligned}
& \int_{\partial \Gamma_T} C^* (Cy(u)(x,t) - z_0(x,t)) (y(v)(x,t) - y(u)(x,t)) dxdt = \\
& = \int_{\partial \Gamma_T} \omega(u)(x,t) (v(x,t) - u(x,t)) dxdt,
\end{aligned}$$

из которого вместе с (9) вытекает неравенство

$$\begin{aligned}
& \int_{\partial \Gamma_T} (\omega(u)(x,t) + Nu(x,t)) \times \\
& \times (v(x,t) - u(x,t)) d\sigma \geq 0
\end{aligned} \tag{13}$$

для любых $v \in \mathbb{U}_\delta$, эквивалентное неравенству (8). Таким образом, справедлива

Теорема 3. Пусть множество \mathbb{U}_δ ограничено.

Для того чтобы элемент $u(x,t) \in \mathbb{U}_\delta$ был оптимальным, необходимо и достаточно, чтобы удовлетворялись следующие соотношения

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma} y(u)(x,t) \eta(x,t) dx - \\
& - \int_{\Gamma_t} y(u)(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} dxdt + \ell_t(y(u), \eta) = \\
& = \int_{\Gamma} \varphi(x) \eta(x,0) dx + \int_{\partial \Gamma_T} u(x,t) \eta(x,t) dxdt + \\
& + \int_{\Gamma_t} f(x,t) \eta(x,t) dxdt
\end{aligned} \tag{14}$$

для любых функций $\eta(x,t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$ и при любом $t \in [0, T]$,

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(u)(x,t)}{\partial t} \zeta(x,t) dxdt + \ell_T(\omega(u), \zeta) = \\
& = \int_{\partial \Gamma_T} C^* (C\omega(u)(x,t) - z_0(x,t)) \zeta(x,t) d\sigma
\end{aligned} \tag{15}$$

для любых функций $\zeta(x,t) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$,

$$\begin{aligned}
& \int_{\partial \Gamma_T} (\omega(u)(x,t) + Nu(x,t)) \times \\
& \times (v(x,t) - u(x,t)) dxdt \geq 0
\end{aligned} \tag{16}$$

для любых $v \in \mathbb{U}_\delta$, где $y(u) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$, $\omega(v) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$ и $\omega(v)(x, T) = 0$.

При этом: 1) если оператор $N \neq 0$, то оптимальный элемент $u \in \mathbb{U}_\delta$ единственен, 2) если $N = 0$, то соотношениям (14)–(16) удовлетворяет по крайней мере один элемент $u \in \mathbb{U}_\delta$; множество таких элементов соответствует совокупности оптимальных, образующих выпуклое подмножество множества \mathbb{U}_δ .

5. Оптимизация параболической системы с запаздыванием. Рассмотрим далее в пространстве $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ эволюционное уравнение (4) с запаздыванием $h \in (0, T)$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right) + \\
& + b(x)y(x,t) + c(x)y(x,t-h) = f(x,t),
\end{aligned} \tag{17}$$

здесь $x, t \in \Gamma_{h,T} = \Gamma_0 \times (h, T)$, коэффициент $c(x)$ – ограниченная измеримая на Γ функция. Каждое решение $y(x,t)$, $x, t \in \Gamma_h$ уравнения (17) определяется начальной функцией $\theta(x,t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_h)$:

$$y(x,t) = \theta(x,t), x, t \in \Gamma_h. \tag{18}$$

Добавляя к соотношениям (17), (18) краевое условие

$$a(x) \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{\partial \Gamma_{h,T}} = v(x,t) \tag{19}$$

(функция $v(x,t)$, как и в разделе 4, принадлежит множеству \mathbb{U}_δ), получим начально-краевую задачу (17) – (19), решение $y(x,t) \equiv y(v)(x,t)$ которой определяет состояние системы (17), (18) в пространстве $V_2^{1,0}(a, \Gamma_{h,T})$.

Определение 2. Слабым решением начально-краевой задачи (17) – (19) называется функция $y(v)(x,t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$, удовлетворяющая условию (18) и интегральному тождеству

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} y(x,t)\eta(x,t)dx - \int_{\Gamma_{h,t}} y(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} dxdt + \ell_{h,t}(y, \eta) + \\ & + \int_{\Gamma_{h,t}} c(x)y(x,t-h)\eta(x,t)dxdt = \int_{\Gamma} \theta(x,h)\eta(x,h)dx + \\ & + \int_{\partial \Gamma_{h,t}} v(x,t)\eta(x,t)dxdt + \int_{\Gamma_{h,t}} f(x,t)\eta(x,t)dxdt \end{aligned}$$

при любом $t \in (h, T)$ и для любой функции $\eta(x,t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$; $\Gamma_{h,t} = \Gamma_0 \times (h, t)$.

Представим уравнение (17) в более удобной для анализа форме [11, с. 270]. Пусть $Z: W_2^1(a, \Gamma_T) \rightarrow W_2^1(a, \Gamma_T)$ – линейный непрерывный оператор (оператор запаздывания), определенный соотношением

$$Zy = \begin{cases} y(x, t-h), x, t \in \Gamma_{h,T}, \\ 0, x, t \in \Gamma_h. \end{cases}$$

Зададим функцию $\theta(x,t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_h)$, удовлетворяющую краевому условию

$$a(x) \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \Big|_{\partial \Gamma_h} = v(x,t),$$

и на Γ_T введем функцию

$$F(x,t) = \begin{cases} f(x,t), x, t \in \Gamma_{h,T}, \\ \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \right) + \\ + b(x)\theta(x,t), x, t \in \Gamma_h, \end{cases}$$

(как понимать это выражение на Γ_h будет ясно ниже) и функцию

$$y_0(x) = \theta(x, 0)$$

(так что $y_0(x) \in L_2(\Gamma)$, так как $y_0(x) \in W_2^1(a, \Gamma) \subset L_2(\Gamma)$ в силу определения

пространства $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ и $\theta(x,t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$). Тогда соотношения (17), (18) примут вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \right) + \\ & + b(x)y(x,t) + c(x)Zy(x,t) = \\ & = F(x,t), x, t \in \Gamma_T, \end{aligned} \quad (20)$$

$$y(x, 0) = y_0(x), x \in \Gamma. \quad (21)$$

К соотношениям (20), (21) добавим краевое условие

$$a(x) \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{\partial \Gamma} = v, x, t \in \partial \Gamma_T \quad (22)$$

и рассмотрим систему (20), (21), состояние которой определяется как решение $y(v)(x,t)$ начально-краевой задачи (20) – (22) в пространстве $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Определение 3. Слабым решением начально-краевой задачи (20) – (22) называется функция $y(v)(x,t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$, удовлетворяющая интегральному тождеству

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} y(v)(x,t)\eta(x,t)dx - \int_{\Gamma_t} y(v)(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} dxdt + \\ & + \ell_t(y(v), \eta) + \int_{\Gamma_t} c(x)Zy(v)(x,t)\eta(x,t)dxdt = \\ & = \int_{\Gamma} y_0(x)\eta(x,h)dx + \int_{\partial \Gamma_t} v(x,t)\eta(x,t)dxdt + \\ & + \int_{\Gamma_t} F(x,t)\eta(x,t)dxdt \end{aligned}$$

при любом $t \in [0, T]$ и для любой функции $\eta(x,t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$.

Если функция $y(v)(x,t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$ является слабым решением задачи (20) – (22), то она и слабое решение задачи (17) – (19). Действительно, при $t \in (0, h)$ тождество (23) в силу представлений $Zy(x,t)$ и $F(x,t)$ на Γ_h превращается в

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma} y(v)(x,t)\eta(x,t)dx - \\
& - \int_{\Gamma_t} y(v)(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} dxdt + \ell_t(y(v), \eta) = \\
& = \int_{\Gamma} y_0(x)\eta(x,h)dx + \int_{\partial\Gamma_t} v(x,t)\eta(x,t)dxdt + \\
& + \int_{\Gamma_t} F(x,t)\eta(x,t)dxdt,
\end{aligned} \tag{23}$$

где

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma_t} F(x,t)\eta(x,t)dxdt = \\
& = \int_{\Gamma} \theta(x,t)\eta(x,t)dx - \int_{\Gamma_t} \theta(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} dxdt + \ell_t(\theta, \eta) - \\
& - \int_{\Gamma} \theta(x,0)\eta(x,h)dx - \int_{\partial\Gamma_t} c(x) \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial x} \eta(x,t)dxdt.
\end{aligned}$$

Откуда в силу первого утверждения теоремы 1 следует, что $y(v) \equiv \theta$ на Γ_h .

При $t \in [h, T)$ в соотношении (23) сделаем следующие преобразования: прибавим и вычтем слагаемое $\int_{\Gamma} y(v)(x,h)\eta(x,t)dx$ и интегралы на $[0, t]$ представим в виде сумм интегралов на $[0, h]$ и $[h, t]$. На отрезке $[0, h]$ получим тождество, аналогичное (24), оставшиеся слагаемые, учитывая представление $Zy(x,t)$ на $\Gamma_{h,t}$, образуют соотношение вида

$$\begin{aligned}
& \int_{\Gamma} y(v)(x,t)\eta(x,t)dx - \\
& - \int_{\Gamma_{h,t}} y(v)(x,t) \frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} dxdt + \ell_{h,t}(y(v), \eta) + \\
& + \int_{\Gamma_{h,t}} c(x)y(v)(x,t-h)\eta(x,t)dxdt = \\
& = \int_{\Gamma} y(v)(x,h)\eta(x,h)dx + \int_{\partial\Gamma_{h,t}} v(x,t)\eta(x,t)dxdt + \\
& + \int_{\Gamma_{h,t}} f(x,t)\eta(x,t)dxdt
\end{aligned} \tag{24}$$

при $t \in [h, T)$. Отсюда и из $y(v)(x,h) = \theta(x,h)$ (следует из (18)) вытекает, что функция $y(v)(x,t)$ удовлетворяет определению 2.

Утверждения теоремы 1 остаются справедливыми и для начально-краевой задачи (20)-(22). Результаты раздела 3 нетрудно распространить и на рассматриваемый здесь случай запаздывания.

Задача оптимизации системы с запаздыванием (20), (21) состоит в том, чтобы отыскать $\inf_{v \in \mathbb{U}_\phi} J(v)$.

Для системы (20), (21) определим сопряженное состояние $\omega(x,t)$, учитывая представление сопряженного оператора $Z^* : W_2^1(a, \Gamma_T) \rightarrow W_2^1(a, \Gamma_T)$

$$Z^* p = \begin{cases} p(x, t+h), x, t \in \Gamma_h, \\ 0, x, t \in \Gamma_{h,h}, \end{cases}$$

как слабое решение $\omega(x,t) \equiv \omega(v)(x,t)$ начально-краевой задачи

$$-\frac{\partial \omega(v)(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial \omega(v)(x,t)}{\partial x} \right) + \tag{25}$$

$$+ b(x)\omega(v)(x,t) + Z^* \omega(v)(x,t) = 0, \tag{26}$$

$$a(x) \frac{\partial \omega(v)}{\partial x} \Big|_{a\Gamma_T} = C^*(Cy(v)(x,t) - z_0(x,t)), \tag{27}$$

в пространстве $W_2^1(a, \Gamma_T)$.

Определение 4. Слабым решением начально-краевой задачи (25) – (27) называется функция $\omega(v)(x,t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$, удовлетворяющая интегральному тождеству

$$\begin{aligned}
& - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(v)(x,t)}{\partial t} \zeta(x,t) dxdt + \ell_T(\omega(v), \zeta) + \\
& + \int_{\Gamma_T} c(x)Z^* \omega(v)(x,t)\zeta(x,t) dxdt = \\
& = \int_{\partial\Gamma_T} C^*(Cy(v)(x,t) - z_0(x,t))\zeta(x,t) dxdt
\end{aligned} \tag{28}$$

для любых функций $\zeta(x,t) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Доказательство однозначной разрешимости задачи (25) – (27) аналогично приведенному в [6, 7], необходимо учитывать специфику представления $Z^* \omega(v)(x,t)$ и сепарабельность пространства $W_2^1(a, \Gamma_T)$ [8–10, 12].

Все утверждения разделов 3 и 4 сохраняют свою силу. Оптимум $u \in \mathbb{U}_\phi$, как показано в теореме 2, характеризуется соотношением (8), которое можно преобразовать с помощью сопряженного состояния системы (21), (22).

Пусть $y(v)(x,t)$ удовлетворяет тождеству (23), $y(u)(x,t)$ – тождеству (23) при $v = u$. Положим в (28)

$$v(x,t) = u(x,t)$$

и

$$\zeta(x, t) = y(v)(x, t) - y(u)(x, t)$$

(ясно, что $\zeta(x, t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T) \subset W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$), получим

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(u)(x, t)}{\partial t} [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dx dt + \\ & + \ell_T(\omega(u), y(v) - y(u)) + \\ & + \int_{\Gamma_T} c(x) Z^* \omega(v)(x, t) \times \\ & \times [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dx dt = \\ & = \int_{\partial \Gamma_T} C^*(C\omega(u)(x, t) - z_0(x, t)) \times \\ & \times [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dx dt. \end{aligned} \quad (29)$$

С другой стороны, в соотношении (23) положим $t = T$ и вычтем из него это же соотношение при $v = u$. Заменяем $\eta(x, t)$ на $\omega(v)(x, t)$, получим соотношение ($\omega(v)(x, T) = 0$)

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] \frac{\partial \omega(v)(x, t)}{\partial t} dx dt + \\ & + \ell_T(y(v) - y(u), \omega) + \\ & + \int_{\Gamma_T} c(x) Z [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] \omega(v)(x, t) dx dt = \\ & = \int_{\partial \Gamma_T} [v(x, t) - u(x, t)] \omega(v)(x, t) dx dt \end{aligned} \quad (30)$$

Сравнивая в (29) и (30) стоящие справа выражения, учитывая симметричность формы $\ell_T(y, \eta)$, представления операторов Z , Z^* и определение сопряженного оператора, приходим к равенству

$$\begin{aligned} & \int_{\partial \Gamma_T} C^*(C\omega(u)(x, t) - z_0(x, t))(y(v)(x, t) - y(u)(x, t)) d\sigma = \\ & = \int_{\partial \Gamma_T} \omega(u)(x, t)(v(x, t) - u(x, t)) d\sigma, \end{aligned}$$

из которого вытекает неравенство

$$\int_{\Gamma_T} (\omega(u)(x, t) + Nu(x, t))(v(x, t) - u(x, t)) d\sigma \geq 0 \quad (31)$$

для любых $v(x, t) \in \mathbb{U}_\delta$, эквивалентное неравенству вида (8).

Замечание 1. Все приведенные рассмотрения не многим отличаются от случая, когда наблюдение финальное и имеет вид $Sy(v) = Dy(v)(x, T)$, где C (оператор финального наблюдения) определяется

линейным непрерывным оператором $D: L_2(\Gamma) \rightarrow L_2(\Gamma)$, например, $Dy(v)(x, T) = y(v)(x, T)$ [5]. Функционал $J(v)$ имеет представление

$$J(v) = \|Dy(v)(x, T) - z_0\|_{L_2(\Gamma)}^2 + (Nv, v)_{\mathbb{U}},$$

где $z_0(x) \in L_2(\Gamma)$ – заданное наблюдение. Неравенство (8) принимает вид

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} (Dy(u)(x, T) - z_0(x))(Dy(v)(x, T) - Dy(u)(x, T)) dx + \\ & + (Nu, v - u)_{\mathbb{U}} \geq 0 \end{aligned}$$

для любых $v \in \mathbb{U}_\delta$. Сопряженное состояние $\omega(v)(x, t)$ системы (20), (21) определяется как слабое решение в пространстве $W_2^1(a, \Gamma_T)$ начально-краевой задачи для уравнения (25) с начальными

$$\omega(v)(x, T) = D^*(Dy(v)(x, T) - z_0(x)), x \in \Gamma \quad (32)$$

и краевыми

$$a(x) \frac{\partial \omega(v)}{\partial x} \Big|_{\partial \Gamma_T} = 0, x, t \in \partial \Gamma_T \quad (33)$$

условиями; тождество (29) для этого решения трансформируется к виду

$$\begin{aligned} & - \int_{\Gamma_T} \frac{\partial \omega(v)(x, t)}{\partial t} \zeta(x, t) dx dt + \ell_T(\omega(v), \zeta) + \\ & + \int_{\Gamma_T} c(x) Z^* \omega(v)(x, t) \zeta(x, t) dx dt = 0 \end{aligned}$$

для любых функций $\zeta(x, t) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$. Доказательство однозначной разрешимости задачи (25), (32), (33) аналогично приведенному в [6, 7].

6. Управляемость системы (20), (21).

Приведем определение управляемости системы (20), (21) в редакции, принятой в монографии [11, с. 214].

Определение 5. Система (20), (21), состояние которой определяется как решение начально-краевой задачи (20) – (22), называется управляемой, если наблюдение $Sy(v)$ замечает подпространство, плотное в пространстве наблюдений $L_2(\Gamma)$, когда внешнее воздействие v на систему (20), (21) пробегает все пространство внешних воздействий \mathbb{U} .

Покажем, что рассматриваемая система (20), (21) управляема. Пусть функция $\rho(x, t)$ из пространства наблюдений $L_2(\partial\Gamma_T)$ ортогональна к подпространству, замечаемому наблюдением $Sy(v)(x, t) = y(v)(x, t)|_{\partial\Gamma_T}$:

$$\int_{\partial\Gamma_T} \rho(x, t) y(v)(x, t) dx dt = 0 \quad (34)$$

для любых $v \in \mathbb{U}$. Рассмотрим функцию $p(x, t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$ как слабое решение начально-краевой задачи

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} \right) + \\ + b(x)p(x, t) + c(x)Z^* p(x, t) = 0, \end{aligned} \quad (35)$$

$$p(x, T) = 0, x \in \Gamma, \quad (36)$$

$$p|_{\partial\Gamma_T} = \rho(x, t), x, t \in \partial\Gamma_T, \quad (37)$$

т. е. функция $p(x, t)$ ($p(x, T) = 0$, $x \in \Gamma$) удовлетворяет интегральному тождеству

$$\begin{aligned} -\int_{\Gamma_T} \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} \zeta(x, t) dx dt + \ell_T(p, \zeta) + \\ + \int_{\Gamma_T} c(x)Z^* p(x, t) \zeta(x, t) dx dt = \\ = \int_{\partial\Gamma_T} \rho(x, t) \zeta(x, t) dx dt \end{aligned} \quad (38)$$

для любой функции $\zeta(x, t) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$. Доказательство однозначной слабой разрешимости задачи (35)–(37) почти дословно повторяет рассуждения при доказательстве теоремы 1.

Положим в соотношении (38) $\zeta(x, t) = y(v)(x, t) - y(u)(x, t)$. Ясно, что $\zeta(x, t) \in V_2^{1,0}(a, \Gamma_T) \subset W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$, тогда

$$\begin{aligned} -\int_{\Gamma_T} \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dx dt + \\ + \ell_T(p, y(v) - y(u)) + \\ + \int_{\Gamma_T} c(x)Z^* p(x, t) [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dx dt = \\ = \int_{\partial\Gamma_T} p(x, t) [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dx dt. \end{aligned} \quad (39)$$

Зафиксируем $t = T$ в соотношении (23) вычтем из него то же самое соотношение при $v = u$, положив при этом $\eta(x, t) = p(x, t)$ ($p(x, T) = 0$):

$$\begin{aligned} -\int_{\Gamma_T} [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] \frac{\partial p(x, t)}{\partial t} dx dt + \\ + \ell_T(y(v) - y(u), p) + \\ + \int_{\Gamma_T} c(x)Z[y(v) - y(u)](x, t) p(x, t) dx dt = \\ = \int_{\partial\Gamma_T} [v(x, t) - u(x, t)] p(x, t) dx dt. \end{aligned} \quad (40)$$

Так как

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma_T} c(x)Z[y(v) - y(u)](x, t) p(x, t) dx dt = \\ = \int_{\Gamma_T} c(x)Z^* p(x, t) [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dx dt, \end{aligned}$$

то, сравнивая правые части (39) и (40), получим

$$\begin{aligned} \int_{\partial\Gamma_T} p(x, t) [y(v)(x, t) - y(u)(x, t)] dx dt = \\ = \int_{\partial\Gamma_T} [v(x, t) - u(x, t)] p(x, t) dx dt. \end{aligned}$$

Отсюда, учитывая (34), следует

$$\int_{\partial\Gamma_T} [v(x, t) - u(x, t)] p(x, t) dx dt = 0,$$

а значит,

$$p|_{\partial\Gamma_T} = 0 \quad (41)$$

и в силу единственности обобщенного решения уравнения (35) с нулевыми исходными данными (36) и (41) получаем $p(x, t) = 0$, значит, как следует из соотношения (37), $\rho(x, t) = 0$ (все равенства здесь понимаются почти всюду). Следовательно, справедлива

Теорема 4. Система (20), (21), состояние которой определяется как обобщенное решение начально-краевой задачи (20)–(22) управляема в пространстве $V_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$.

Замечание 2. Если рассматривается финальное воздействие (см. замечание 1) на систему (20), (21), то указанная система остается управляемой. В этом случае функция $\rho(x)$ принадлежит пространству наблюдений $L_2(\Gamma)$ и ортогональна к подпространству, замечаемому наблюдением

$Cy(v)(x,t) = Dy(v)(x,T)$, соотношение (34)
заменяется на

$$\int_{\Gamma} \rho(x)y(v)(x,T)dxdt = 0$$

для любых $v \in \mathbb{U}$. Функция $p(x,t) \in W_2^1(a, \Gamma_T)$ является слабым решением начально-краевой задачи

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \right) + \\ & + b(x)p(x,t) + c(x)Z^* p(x,t) = 0, \\ & p(x,T) = \rho(x), x \in \Gamma, \quad p|_{\sigma_T} = 0, \end{aligned}$$

т. е. удовлетворяет интегральному тождеству

$$\begin{aligned} & -\int_{\Gamma_T} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \zeta(x,t) dxdt + \ell_T(p, \zeta) + \\ & + \int_{\Gamma_T} c(x)Z^* p(x,t) \zeta(x,t) dxdt = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

для любой функции $\zeta(x,t) \in W_2^{1,0}(a, \Gamma_T)$. Все рассуждения данного раздела остаются справедливыми.

7. Заключение. Отметим неклассическую особенность представленных рассмотрений для дифференциальных систем (4) и (20), (21) с распределенными параметрами на графе – используются пространство суммируемых на цилиндре Γ_T функций в качестве пространства состояний задач (4), (5) и (20) – (22), при этом пространство суммируемых на $\partial\Gamma_T$ включает пространство граничных воздействий и граничных наблюдений. Представленные подходы частично использованы в работах [13 – 18] одного из авторов. Отметим также аналогичные идеи при анализе устойчивости нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием [19, 20], стабилизации динамических систем [21 – 23] и при изучении волновых процессов [24, 25] с учетом стохастических явлений [26, 27], особенно при управлении динамическими системами в критических ситуациях [13,16,17,28]. Остается отметить существенную возможность применимости представленных рассмотрений – прикладные задачи сетевой гидродинамики для многофазных сред.

Литература

1. Провоторов В.В. Математическое моделирование колебательных процессов

поддерживающих растяжек упругой мачты // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2006. № 2. С. 28-35.

2. 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.

3. Подвальный, С.Л. Определение стартовой функции в задаче наблюдения параболической системы с распределенными параметрами на графе [Текст] / С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10, № 6. - С. 29-35.

4. Провоторов В.В. Оптимальное управление параболической системой с распределенными параметрами на графе // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2014. Вып. 3. С. 154-163.

5. Подвальный С.Л., Провоторов В.В. Стартовое управление параболической системой с распределенными параметрами на графе // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2015. Вып. 3. С. 126-142.

6. Подвальный, С.Л. Управляемость дифференциальной системы параболического типа с распределенными параметрами на графе [Текст] / С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11, № 3. - С. 49-56.

7. Провоторов В.В., Гнилицкая Ю.А. Граничное управление волновой системой в пространстве обобщенных решений на графе // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2013. Вып. 3. С. 112-120.

8. Волкова А.С., Провоторов В.В. Обобщенные решения и обобщенные собственные функции краевых задач на геометрическом графе // Известия высших учебных заведений. Математика. 2014. № 3. С. 3-18.

9. Провоторов В.В. Собственные функции краевых задач на графах и приложения. Воронеж, 2008.

10. Провоторов В.В. Собственные функции задачи Штурма-Лиувилля на графе-звезде Математический сборник. 2008. Т. 199. № 10. С. 105-126.

11. Лионс Ж.Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными / пер. с фр. Н. Х. Розова; под ред. Р. В. Гамкрелидзе. М.: Мир, 1972.

12. Провоторов В.В. Спектральная задача на графе с циклом. // Дифференциальные уравнения. 2010. Т. 46. № 11. С. 1665.

13. Подвальный, С.Л. Концепция многоальтернативного управления открытыми системами: истоки, состояние и перспективы [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9, № 2. - С. 4-20.

14. 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.

15. 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.

16. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Многоальтернативные системы: концепция, состояние и перспективы // Управление большими системами: сборник трудов. 2014. № 48. С. 6-58.

17. 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.

18. Podval'ny S.L., Ledeneva T.M. Intelligent Modeling Systems: Design Principles // Automation and Remote Control. 2013. Т. 74, N 7. С. 1201-1210.

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

20. Александров А.Ю., Жабко А.П. Об асимптотической устойчивости решений одного класса систем нелинейных дифференциальных уравнений с запаздыванием // Известия вузов. Математика. 2012. № 5. С. 3-12.

21. Веремей Е.И. Алгоритмы решения одного класса задач H_{∞} -оптимизации систем управления // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 3. С. 52-61.

22. Веремей Е.И. Основные направления применения компьютерных технологий в задачах управления динамическими объектами // Вестник Воронежского государственного университета. Серия

Системный анализ и информационные технологии. 2012. № 1. С. 16-21.

23. Веремей, Е.И. Спектральное представление оптимальных решений задач среднеквадратичного синтеза [Текст] / Е.И. Веремей // Системы управления и информационные технологии. - 2012. - № 3.1 (49). - С. 124-128.

24. Provotorov V.V. Boundary control of a parabolic system with distributed parameters on a graph in the class of summable functions // Automation and Remote Control. 2015. Т. 76. № 2. С. 318-322.

25. Провоторов, В.В. К вопросу построения граничных управлений в задаче о гашении колебаний системы "мачта-растяжки" [Текст] / В.В. Провоторов // Системы управления и информационные технологии. - 2008. - Т. 32, № 2.2. - С. 293-297.

26. Карелин В.В. Штрафные функции в задаче управления процессом наблюдения // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2010. Вып. 4. С. 109-114.

27. Потапов Д.К. Оптимальное управление распределенными системами эллиптического типа высокого порядка со спектральным параметром и разрывной нелинейностью // Изв. РАН. ТИСУ. 2013. № 2. С. 19-24.

28. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2012. - Т. 48, №2. - С.4-13.

29. 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.

Воронежский государственный технический университет
Воронежский государственный университет

THE OPTIMIZATION PROBLEM OF PARABOLIC SYSTEM WITH DELAY AND DISTRIBUTED PARAMETERS ON THE GRAPH S.L. Podvalny, V.V. Provotorov

Optimization of differential systems in the Banach space, whose state is defined as a weak solution of the boundary value problem for a parabolic equation with distributed parameters on the graph - it is a new direction in the analysis of the processes described by evolution equations on networks. In the work it is obtained the necessary and sufficient conditions for the optimum in situation is conditioned by the fixed delay of the spatial variable. And it is indicated the way for research of more general problems with distributed parameters on the net-like areas

Key words: differential systems in the Banach space, the fixed delay, the distributed parameters on the graph, the optimization problem

РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДОСТУПА К ЭЛЕКТРОННОМУ АРХИВУ С ПОМОЩЬЮ МОБИЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА

А.Д. Поваляев, С.Л. Подвальный, А.И. Сукачев, А.М. Нужный

В статье рассмотрен пример использования мобильного терминала для организации доступа к электронному архиву предприятия на основе системы 1С:PDM

Ключевые слова: распределенные системы, взаимодействие систем, мобильный терминал, система 1С:PDM

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом вычислительные возможности мобильных устройств приближаются к вычислительным возможностям персональных компьютеров (ПК). Это является серьезным основанием для использования мобильных технологий в различных областях жизнедеятельности.

В статье предложена концепция использования мобильных устройств для организации электронного документооборота и доступа к электронному архиву (ЭА) предприятия. Предпосылкой для рассмотрения этой концепции послужило использование указанных выше систем не только на этапе разработки, но и на этапе производства. В частном случае рассматривается вопрос применения мобильных терминалов доступа к электронному архиву в цехах и удаленных производственных центрах.

В статье представлен анализ использования мобильного PDM-терминала в составе программно-аппаратного модуля «Архив», в котором в качестве системы электронного документооборота и электронного архива используется 1С:PDM [1].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим несколько важных критериев использования мобильных терминалов на предприятии:

1. Функциональность.
2. Экономичность.
3. Масса габаритные показатели.

В процессе использования систем электронного документооборота и электронного архива на предприятии на этапе производства нет необходимости использовать весь функционал предоставляемый системой 1С:PDM [2]. Поэтому применение мобильных терминалов с ограниченным функционалом на этом этапе более предпочтительно в виду простоты их освоения и использования в сравнении с базовой системой. Пример: в производственных центрах на этапе производства пользователям необходим доступ к архивной документации в режиме «для чтения», а система 1С:PDM позволяет не только просматривать электронную структуру изделия, но и изменять ее путем добавления, редактирования и удаления документов. Все эти функции система предоставляет в зависимости от прав пользователя назначенных администратором [3]. Но так как у пользователя нет таких прав, то эти функции не используются.

По экономическим показателям мобильные системы выигрывают у стационарных систем за счет наличия бесплатной операционной системы, а также за счет дешевизны аппаратного и программного обеспечения. Помимо этого, мобильные устройства имеют меньшие масса-габаритные показатели по сравнению с ПК.

Таким образом можно сделать вывод о том, что использование мобильных терминалов на производственных участках предпочтительнее, чем использование ПК.

По территориальному расположению центров разработки и производственных центров предприятия можно разделить на локальные и распределенные.

К локальным предприятиям можно отнести предприятия, у которых центры разработки и центры производства находятся

Поваляев Анатолий Дмитриевич – ВГТУ, канд. физ.-мат.

наук, доцент, e-mail: povalyaev@vorstu.ru

Подвальный Семен Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 243 - 77 - 18

Сукачев Александр Игоревич – ВГТУ, аспирант, e-mail: mag.dip@yandex.ru

Нужный Александр Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: naml4@mail.ru

на одной территории и имеют единый доступ к архиву предприятия.

К распределенным предприятиям можно отнести предприятия, у которых центры разработки и центры производства территориально разнесены друг от друга [4].

ПРОЕКТ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Рассмотрим вопрос организации доступа к электронному архиву предприятия. В случае локальных предприятий доступ к электронному архиву обеспечивается объединением всех пользователей электронного архива в единую локальную сеть. В случае распределенных предприятий возникает проблема создания единого электронного архива предприятия. Для решения этой проблемы используют локальные версии электронного архива в каждом распределенном центре.

При наличии одного центра разработки и нескольких территориально удаленных производственных центров оригинальная версия электронного архива хранится в центре разработки, а для производственных центров создаются локальные копии электронного архива, содержащие необходимую для данного производства технологическую документацию.

Рассмотрим пример использования мобильного терминала на предприятии для организации доступа к электронному архиву. На рис. 1 приведена схема подключения мобильного терминала к системе 1С:PDM.

Как видно из рис. 1, система мобильных PDM-терминалов является распределенным программным продуктом, состоящим из серверной и клиентской частей.

Клиентская часть устанавливается на мобильном устройстве и представляет собой интерфейс доступа к системе электронного документооборота и электронному архиву предприятия, а также сторонним приложениям и СУБД. Программное обеспечение мобильного PDM-терминала имеет следующий функционал:

1. Поиск в электронном архиве предприятия.
2. Отображение электронной структуры изделия.
3. Обеспечение электронного документооборота.

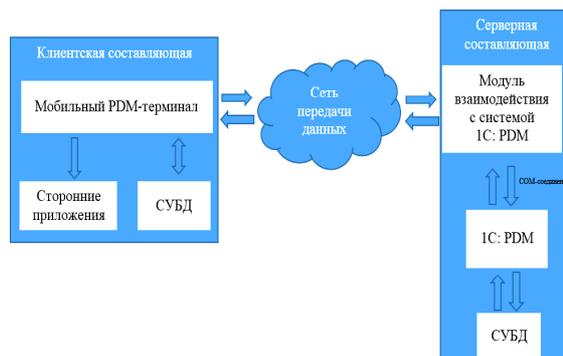


Рис. 1. Схема подключения мобильного терминала к системе 1С:PDM

Для «просмотра» документов, входящих в электронную структуру изделия могут использоваться сторонние приложения. Например для просмотра файлов САД-систем используется программный продукт фирмы Autodesk Inc A360, который поддерживает более 100 различных форматов: Autodesk AutoCAD, Inventor, Fusion 360, Revit, Navisworks, SolidWorks, CATIA, такие форматы файлов, как PDF, DWF, DWFx, STL, STP, STEP, IGE, IGES, OBJ, SAT и многие другие.

На рис. 2 приведен пример использования A360 на мобильном терминале.



Рис. 2. Пример использования A360 на мобильном терминале

Серверная составляющая устанавливается на сервере 1С:PDM. Она необходима для организации информационного взаимодействия системы 1С:PDM с системой мобильный PDM-терминал. Механизм взаимодействия серверной составляющей мобильного PDM-терминала с системой 1С:PDM реализован с использованием COM-технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование мобильных PDM-терминалов позволяет ускорить и удешевить процесс внедрения технологии электронного документооборота и электронного архива, обеспечить доступ к требуемой технологической документации из всех производственных центров.

Работа выполнена по договору № 1450/300-13 от 24 февраля между ОАО «Турбонасос» и ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет» в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства магистральных нефтяных насосов нового поколения с использованием методов многокритериальной оптимизации и уникальной экспериментальной базы» (Постановление Правительства Российской Федерации №218 от 9.04.2010)

Литература

1. Создание электронного архива средствами PDM-систем [Текст] / А.М. Нужный, В.В. Сафронов, А.В.

Барабанов, А.В. Гаганов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. – Т. 9, № 6.1. - С. 23-27.

2. Алгоритм ассоциирования файлов проекта системы 1С:PDM со сторонними приложениями [Текст] / А.И. Сукачев, А.М. Нужный, А.В. Гаганов, В.В. Сафронов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10, № 5. - С. 50-52.

3. Алгоритм запуска сторонних приложений из системы 1С:PDM [Текст] / А.И. Сукачев, А.М. Нужный, А.В. Гаганов, В.В. Сафронов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 5. С. 64-66.

4. Проблемы разработки интеллектуальных систем многоальтернативного моделирования [Текст] / С.Л. Подвальный, Т.М. Леденева, А.Д. Поваляев, Е.С. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т.9, №3-1. -С.19-23.

Воронежский государственный технический университет

ORGANIZATION OF INTER-SYSTEM INTERACTION OF PDM-TERMINAL WITH 1С:PDM

A.D. Povalyaev, S.L. Podvalny, A.I. Sukachev, A.M. Nuzhny

In the article the example of usage of the mobile terminal for access to electronic archives of the enterprise

Key words: distributed systems, interaction systems, the mobile terminal, the system 1С:PDM

Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский

В статье рассматривается вариант динамической постановки задачи о ранце и алгоритм ее решения на основе модификации метода Беллмана

Ключевые слова: динамическое программирование, дискретное программирование, задача о ранце

Введение

В настоящее время в области теории дискретного программирования актуальность приобретает задача рассмотрения классических оптимизационных моделей в динамической постановке. Практические применения данной задачи связаны с ее реализацией в рамках развивающихся объектов в области ИТ (мультисервисные сети), экологических, энергетических систем и т.д. Ниже предлагается вариант динамической постановки задачи о ранце и алгоритм ее решения на основе модификации метода Беллмана [1,2,3].

Постановка задачи

Сформулируем данную задачу на примере процесса динамического наполнения продуктовой потребительской корзины. Пусть имеется множество продуктов $B = \{b_1, b_2, \dots, b_I\}$, каждый из которых имеет свою стоимость $c_i, i = \overline{1, I}$ и энергетическую ценность $v_i, i = \overline{1, I}$. На рассматриваемом временном интервале $[0; T]$ необходимо спланировать наполнение индивидуальной продуктовой корзины для каждого момента времени $\tilde{t}_k \in [0; T], k = \overline{1, K}$ с учетом минимизации затрат на приобретение продуктов таким образом, чтобы суммарная энергетическая ценность превышала минимально установленную V_{\min} для планируемого рассматриваемого интервала. Формально данная задача может быть сведена к следующей оптимизационной модели [4]:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x(t_{ki}) c_i \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I x(t_{ki}) v_i \geq V_{\min} \quad (2)$$

$$x(t_{ki}) = \begin{cases} 1, & \text{продукт } b_i \text{ входит в корзину} \\ & \text{на подынтервале времени } \tilde{t}_k; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

Данная задача является модифицированной версией задачи о ранце [4]. Для ее решения воспользуемся методом динамического программирования. Будем считать, что решение о включении продукта в корзину для каждого момента времени \tilde{t}_k принимается на отдельной подынтервале времени t_{ki} . Таким образом, временной интервал $[0; T]$ можно разбить на отдельные подынтервалы принятия решений $t_{ki} \in [0; T], k = \overline{1, K}, i = \overline{1, I}$.

Пусть $S(t_{K'T'}, V')$ - оптимальное значение целевой функции. Тогда справедливы следующие рекуррентные соотношения [4,6]:

$$S(t_{11}, V') = \begin{cases} 0, V' = 0, \\ c_1, 0 < V' \leq v_1, \\ +\infty, V' > v_1; \end{cases} \quad (4)$$

$$S(t_{ki}, V') = \min \begin{cases} S(t_{ki-1}, V'), x(t_{ki}) = 0, \\ c_i + \\ + S(t_{ki-1}, \max\{0, V' - v_i\}), x(t_{ki}) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{\min} \leq V' \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I v_i. \quad (6)$$

Пример

Рассмотрим реализацию процедуры решения задачи о наполнении индивидуальной продуктовой корзины на следующем примере.

Пусть временной интервал $[0; T]$ разбит на $K = 3$ подынтервалов и $V_{\min} = 9$. Оставшиеся параметры задачи заданы в табл. 1. Для облегчения записи будем считать, что ценность v_i и стоимость c_i - целочисленные величины.

Таблица 1

i	1	2	3
c_i	6	5	4
v_i	3	1	2

Елизаров Дмитрий Эдуардович – ВГТУ, аспирант, e-mail: elizarovdm@list.ru
Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

Таблица 4

$t_{ki} \backslash V'$	13	14	15	16	17	18
t_{11}	-	-	-	-	-	-
t_{12}	-	-	-	-	-	-
t_{13}	-	-	-	-	-	-
t_{21}	-	-	-	-	-	-
t_{22}	-	-	-	-	-	-
t_{23}	-	-	-	-	-	-
t_{31}	26/1	29/1	35/1	-	-	-
t_{32}	26/0	29/1	34/1	40/1	-	-
t_{33}	26/0	29/0	30/1	33/1	38/1	44/1

Тогда решение данной задачи приведет к заполнению таблицы размерности 9×19 . Для упрощения отображения разделим данные на 3 таблицы 9×7 , 9×6 , 9×6 . В первой таблице будут содержаться расчетные значения, не удовлетворяющие критерию задачи, однако необходимые для ее решения. Прочерками в таблицах обозначим бесконечно большие величины (когда нет допустимых решений). Так же в таблицах через / будем хранить соответственное условно оптимальное значение $x(t_{ki})$. Если условно оптимальных решений несколько, то будем запоминать только одно из них.

Таблица 2

$t_{ki} \backslash V'$	0	1	2	3	4	5	6
t_{11}	0	6/0	6/0	6/1	-	-	-
t_{12}	0	5/1	6/0	6/0	11/1	-	-
t_{13}	0	4/1	4/1	6/0	10/1	10/1	15/1
t_{21}	0	4/0	4/0	6/1	10/0	10/0	12/1
t_{22}	0	4/0	4/0	6/0	10/0	10/0	12/0
t_{23}	0	4/1	4/1	6/0	8/1	10/1	12/0
t_{31}	0	4/0	4/0	6/1	8/0	10/0	12/0
t_{32}	0	4/0	4/0	6/0	8/0	10/0	12/0
t_{33}	0	4/0	4/0	4/1	8/0	10/1	12/1

Исходя из расчетов в табл. 2-4 оптимальное значение целевой функции достигается в состоянии $S(t_{33}, 9) = 18$. При этом условно оптимальное решение $x(t_{33}) = 1$. Применим обратный ход алгоритма для получения оптимальных значений $x(t_{ki})$, $k = \overline{1, K}$, $i = \overline{1, I}$ [4]. Результаты вычислений представлены в табл. 5:

Таблица 5

	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{21}	t_{22}	t_{23}	t_{31}	t_{32}	t_{33}
$x(t_{ki})$	0	0	1	0	0	1	0	0	1
V'	2	3	5	5	5	7	7	7	9

Таким образом, решением данной задачи является вектор $x^* = (0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1)$.

Алгоритм решения

Предложенный алгоритм решения динамической задачи о ранце формально предполагает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Формируем таблицу размерности $k \cdot i \times \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I v_i$, $0 \leq V' < \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I v_i$ решений, не учитывая критерий минимизации (2). Двигаясь снизу вверх формируем оптимальное значение целевой функции для каждого подынтервала $t_{ki} \in [0; T]$.

Таблица 3

$t_{ki} \backslash V'$	7	8	9	10	11	12
t_{11}	-	-	-	-	-	-
t_{12}	-	-	-	-	-	-
t_{13}	-	-	-	-	-	-
t_{21}	16/1	16/1	21/1	-	-	-
t_{22}	16/0	16/0	21/0	25/1	-	-
t_{23}	14/1	16/1	20/0	20/1	25/1	29/1
t_{31}	14/0	16/0	18/1	20/0	22/1	26/1
t_{32}	14/0	16/0	18/0	20/0	22/0	26/0
t_{33}	14/1	16/1	18/1	20/1	22/1	24/1

Шаг 2. Выбираем минимальное значение целевой функции для подынтервала времени t_{KI} из таблицы, сформированной на шаге 1.

Шаг 3. Применяем обратный ход алгоритма для получения оптимальных значений $x(t_{ki})$, $k = \overline{1, K}$, $i = \overline{1, I}$.

Заключение

Представленная модель поможет в решении задач, основанных на долгосрочном планировании приобретения либо модернизации существующих продуктов с учетом минимизации затрат. При этом формирование рекуррентных соотношений, определяющих работу алгоритма, осуществляется в зависимости от конкретного вида целевой функции [4,6].

Литература

1. Елизаров, Д.Э. Оптимизационные модели формирования структуры развивающихся

мультисервисных сетей информационного обслуживания населения [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. - № 1. - С 20-23.

2. Елизаров, Д.Э. Обобщенная оптимизационная модель развития мультисервисных сетей [Текст] / Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский, А.П. Воропаев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11. - № 3. – С. 28-30.

3. Елизаров Д.Э., Бурковский В.Л. Модели проектирования развивающихся мультисервисных сетей // Перспективные исследования и разработки в области информационных технологий, Издательство: Научная книга (Воронеж), 2014. – С 409-412.

4. Pisinger D. Knapsack problems / D. Pisinger, H. Kellerer, U. Pferschy. – Springer Science & Business Media, 2013. – 548 с.

5. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: ИЛ, 1960. – 400 с.

6. Беллман Р., Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. - М.: Наука, 1965. — 460 с.

Воронежский государственный технический университет

THE MODIFICATION OF THE BELLMAN METHOD FOR SOLVING DYNAMIC KNAPSACK PROBLEM

D.E. Elizarov, V.L. Burkovsky

The article describes the option of dynamic formulation of the knapsack problem and the algorithm of its solution based on the modification of the Bellman's method

Key words: dynamic programming, discrete programming, knapsack problem

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЫСТРОГО ДИСКРЕТНОГО СПЛАЙНОВОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ КОРРЕЛИРОВАННОСТИ ДИСКРЕТНО ЗАДАННЫХ ДАННЫХ

И.А. Блатов, Ю.А. Герасимова

Рассмотрен метод быстрого дискретного вейвлет-преобразования в пространстве сплайновых вейвлетов на конечном отрезке. Описан алгоритм применения сплайновых вейвлетов и ослабления коррелированности последовательности сильнокоррелированных случайных величин. Исследован метод оценки декоррелирующих свойств ортогональных преобразований. Проведена сравнительная оценка эффективности быстрого дискретного вейвлет-преобразования на базе сплайновых вейвлетов и преобразования Добеши в рамках задачи теории массового обслуживания

Ключевые слова: вейвлет-анализ, сплайновые вейвлеты, декорреляция, вейвлет-преобразование

Введение

Пусть имеется некоторый вектор $X = (x_0, \dots, x_n)^T$ с известной корреляционной матрицей A .

В случае если сильная коррелированность создает значительные трудности при решении конкретных задач, используется прием, заключающийся в предварительном выполнении некоторого ортогонального преобразования, определяемого матрицей $T = (t_{ij})$, целью которого является устранение или снижение корреляции исходных данных.

Использование современных методов анализа из теории массового обслуживания относительно вектора $\tilde{X} = TX$, а не вектора X , оказывается гораздо более эффективным.

Устранить коррелированность и получить наилучший результат можно путем использования преобразования Карунена-Лозва. В этом случае матрица T состоит из собственных векторов матрицы A , и полученная корреляционная матрица будет иметь диагональный вид. Однако у этого метода есть ряд недостатков: отсутствие быстрых алгоритмов вычисления; зависимость от структуры матрицы A ; высокая ресурсоемкость задачи построения такого базиса.

Поэтому актуальна задача построения более доступных базисов, в которых коррелированность можно если не устранить, то существенно ослабить. В настоящем докладе для этой цели исследуются сплайновые вейвлеты.

Построение систем полуортогональных сплайновых вейвлетов

Пусть $[a, b]$ – произвольный отрезок, $m \geq 1$ – натуральное число, n_0 – такое целое число, что $2^{n_0} < 2m + 1 < 2^{n_0+1}$ и k – такое целое число, что $2^k > 2m - 1$.

Рассмотрим семейство $\Delta = \{\Delta_n, n = n_0, n_0 + 1, \dots\}$ разбиений отрезка $[a, b]$ с шагом $h = h_n = (b - a)/2^n$. Обозначим через $S(\Delta_n, m, k)$ совокупность сплайнов степени m дефекта k , определенных на сетке Δ_n .

На каждом разбиении рассмотрим пространство сплайнов $L_n = S(\Delta_n, m - 1, 1)$. Тогда для каждого $k \geq n_0$ пространство $S(\Delta_n, m - 1, 1)$ можно представить в виде прямой суммы $L_k = L_{n_0} \oplus W_{n_0+1} \oplus W_{n_0+2} \oplus \dots \oplus W_k$, где через W_k обозначено ортогональное дополнение пространства L_{k-1} до пространства L_k . Вейвлет-базис получается как объединение базиса в L_{n_0} и всех базисов в пространствах $W_n, n_0 \leq n \leq k$.

Для $i \geq 0$, такого, что отрезок $[x_i^{n-1}, x_{i+2m-1}^{n-1}]$ целиком содержится в $[a, b]$, функцию $\psi_{i,n}(x) \in W_n$ будем искать по формуле

$$\psi_{i,n}(x) = \sum_{j=2i}^{2i+3m-2} \alpha_j \phi_{j,n-1} \quad (1)$$

где $\phi_{k,n-1}$ – нормированный В-сплайн, вычисляющийся по формуле

$$\phi_{j,n-1} = \begin{cases} x - x_j^{n-1}, & x \in [x_j^{n-1}, x_{j+1}^{n-1}) \\ x_{j+2}^{n-1} - x, & x \in [x_{j+1}^{n-1}, x_{j+2}^{n-1}) \\ 0, & x \notin [x_j^{n-1}, x_{j+2}^{n-1}) \end{cases}$$

Коэффициенты α_j находятся из условия

$$(\psi_{i,n}(x), \phi_{k,n-1}) = 0, \quad k = i - m + 1, i - m + 2, \dots, i + 2m - 2 \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2) получим

$$\sum_{j=2i}^{2i+3m-2} \alpha_j (N_{m-1,j,n}, N_{m-1,j,n-1}) = 0,$$

$$k = i - m + 1, i - m + 2, \dots, i + 2m - 2$$

Полученная система всегда имеет нетривиальное решение.

Совокупность построенных вейвлет-функций получается сдвигом одной единственной функции $\psi_{0,n}$ по формуле

$$\psi_{i,n}(x) = \psi_{0,n}(2^{n-n_0}x - i(b-a)/2^{n_0-1})$$

Таким образом будет построена совокупность полуортогональных линейно независимых вейвлет-функций $\psi_{i,n}(x), i =$

Блатов Игорь Анатольевич – ПГУТИ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: blatow@mail.ru
Герасимова Юлия Андреевна – ПГУТИ, аспирант, e-mail: gerasimova.ju@yandex.ru

$0, 1, \dots, 2^{n-1} - 2m + 1$. Однако размерность W_n равна 2^{n-1} , т.е. до базиса в W_n не хватает $2(m-1)$ функций. Первая группа недостающих вейвлетов ищется по следующим формулам

$$\tilde{\psi}_{i,n}(x) = \psi_{i,n}(x) - \sum_{j=-2m+2}^{-m} \alpha_j \psi_{j,n}(x),$$

$$-m + 1 \leq i \leq -1$$

Исходя из условия

$$(\tilde{\psi}_{i,n}(x), \phi_{k,n-1}) = 0, k = -m + 1, \dots, -1$$

Вторая группа ищется исходя из следующего

$$\tilde{\psi}_{i,n}(x) = \psi_{i,n}(x) - \sum_{j=2^{n-1}-m+1}^{2^{n-1}-1} \alpha_j \psi_{j,n}(x),$$

$$2^{n-1} - m + 1 \leq i \leq 2^{n-1} - m$$

Исходя из условия

$$(\tilde{\psi}_{i,n}(x), \phi_{k,n-1}) = 0,$$

$$k = 2^{n-1} - m + 1, \dots, 2^{n-1} - 1$$

Быстрое дискретное вейвлет-преобразование в пространстве сплайновых вейвлетов на конечном отрезке

Задача прямого преобразования заключается в поиске набора коэффициентов

$$\{d_{0j}, -m + 1 \leq j \leq 2^{n_0} - 1\} \bigcup_{i=1}^{k-n_0} \{c_{ij},$$

$$-m + 1 \leq j \leq 2^{n_0+i-1} - m\}$$

по заданной функции $f = \{f_{ij}\}, 0 \leq i \leq 2^k - 1, 1 \leq j \leq s$.

Задача обратного вейвлет-преобразования заключается в восстановлении всех значений $f_{ij}, 0 \leq i \leq 2^k - 1, 1 \leq j \leq s$ функции $\{f_{ij}\} \in \tilde{S}(\Delta_k, m - 1, 1)$ по заданному набору коэффициентов, если

$$f = \sum_{j=-m+1}^{2^{n_0}-1} d_{0j} \phi_{j,n_0} + \sum_{i=1}^{k-n_0} \sum_{j=-m+1}^{2^{n_0+i-1}-m} c_{ij} \psi_{j,n_0+i} \quad (3)$$

Подробнее, построение систем полуортогональных сплайновых вейвлетов и алгоритм прямого и обратного быстрого дискретного вейвлет-преобразования описаны в [1].

Численный эксперимент

Был проведен эксперимент по ослаблению коррелированности данных¹, представляющих собой последовательность X из $n = 9999$ случайных величин, каждая из которых – время обработки пакета трафика в системе.

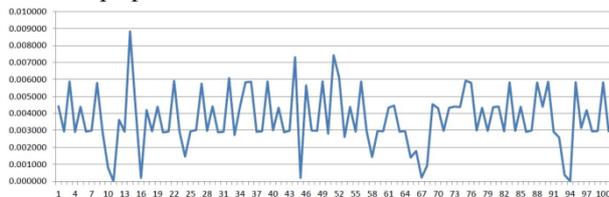


Рис. 1. Последовательность X

¹ Постановка задачи о декорреляции и данные для эксперимента были предоставлены к.т.н., доцентом кафедры Теории передачи сигналов ПГУТИ Каргашевским И.В.

К полученной последовательности было применено прямое быстрое дискретное вейвлет-преобразование на базе линейного сплайна. Полученная в результате этого последовательность \tilde{X} отображена на рис.2



Рис. 2. Последовательность \tilde{X}

Для обеих последовательностей были вычислены коэффициенты корреляции (см. [3]) по формулам:

$$R_k = \frac{V_k}{D} \quad (4)$$

где

$$V_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (Y_k - X)(Y_{i+k} - X)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X)^2$$

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

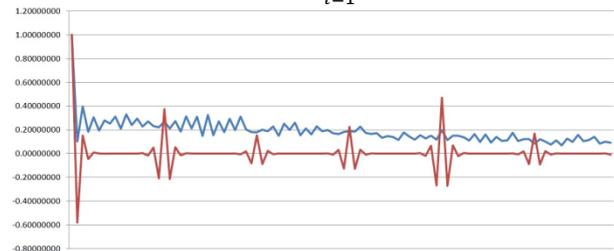


Рис. 3. Коэффициенты корреляции для X, \tilde{X}

Для оценки эффективности применения прямого быстрого дискретного вейвлет-преобразования были вычислены суммы модулей коэффициентов корреляции для обеих последовательностей

$$R_k(X): \sum_{i=0}^{k-1} |r_i| = 18.963$$

$$\tilde{R}_k(\tilde{X}): \sum_{i=0}^{k-1} |\tilde{r}_i| = 5.344$$

Как видно из результата, корреляция данных снизилась более чем в 3,5 раза.

Способ оценки декоррелирующих свойств ортогональных преобразований

В [4] рассматривается возможность применения понятия энтропии в качестве характеристики декоррелирующих свойств ортогональных преобразований. Она вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta H(T, A) = \frac{1}{2N} \log \left(\prod_{i=0}^{N-1} \frac{\sigma_i^2}{\det A} \right) \quad (5)$$

где N — количество элементов вектора X , σ_i^2 — диагональные элементы матрицы $\tilde{A} = TAT^{-1}$, где T^{-1} — прямое преобразования, T — обратное преобразование.

Значение ΔH называется средней избыточной энтропией. Чем больше её значение, тем меньше эффективность декоррелирующего преобразования с матрицей T , соответственно, чем меньше её значение, тем ближе свойства используемого преобразования к оптимальным, т.е. к свойствам преобразования Карунена-Лоэва.

Обратим внимание на то, что автор данного подхода ставит строгое условие относительно ортогональности исследуемого преобразования. В нашем случае, преобразование является полуортогональным, следовательно, вычислить среднюю неопределенность напрямую нельзя. Обойти эту проблему можно путем использования свойств базиса Рисса.

Сравнение декоррелирующих свойств быстрого дискретного вейвлет преобразования на базе сплайновых вейвлетов и преобразования Добеши

На основе экспериментальных данных построим выборки

$$\begin{aligned}\tilde{X}_s &= T_s X \\ \tilde{X}_d &= T_d X\end{aligned}$$

где T_s — матрица прямого преобразования на базе сплайновых вейвлетов, T_d — матрица прямого преобразования Добеши.

Вычислим сумму модулей коэффициентов корреляции для каждой выборки и среднюю избыточную энтропию:

	X	\tilde{X}_s	\tilde{X}_d
$\sum_{i=0}^{N-1} r_i $	18.963	5.344	7.941
$\Delta H(T, A)$	-	0,082	0,139

Заключение

Таким образом, среди исследованных преобразований, потенциально наиболее эффективным для декорреляции является вейвлет-преобразование на базе сплайновых вейвлетов.

Литература

1. Блатов И.А. Полуортогональные сплайновые вейвлеты и метод Галеркина численного моделирования тонкопроволочных антенн / И.А. Блатов, Н.В. Рогова // Журнал вычислительной математики и математической физики. – Самара, том 53, №5 : 2013. – 727-736 с.
2. Блатов И.А. Применение быстрого дискретного вейвлет-преобразования на базе сплайновых вейвлетов для ослабления коррелированности последовательностей данных / И.А. Блатов, Ю.А.Герасимова // Материалы международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии». – Самара : 2015. – 22-25 с.
3. Карташевский И.В. Расчет коэффициентов корреляции временных интервалов в последовательности событий // Журнал «Электросвязь». - №10 : 2012. – 37-39 с.
4. Умняшкин С.В. Анализ эффективности использования ортогональных преобразований для цифрового кодирования коррелированных данных/ С.В. Умняшкин, М.Е. Кочетков // Известия вузов. Электроника. - №6 : 1998. -79-84 с.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара

EFFICIENCY EVALUATION OF APPLICATION OF FAST DISCRETE SPLINE WAVELET TRANSFORMATION FOR LOOSENING CORRELATION OF DISCRETELY SET DATA

I.A. Blatov, Yu.A. Gerasimova

The task of loosening of correlation of sequence of strongly correlated random variables within the mass service theory is set. The algorithm of application of spline wavelet for loosening of correlation of sequence of strongly correlated random variables is described. Properties of the matrixes received as a result of application of transformation algorithm are studied. Results of numerical experiment studies are given

Key words: wavelet-analysis, spline wavelets, decorrelation, wavelet transformation

НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯ ANSYS DESIGNXPLORER

А.В. Кретинин, Д.Н. Галдин, Д.П. Шматов

Рассмотрен алгоритм недетерминированного математического моделирования гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса средствами пакета конечно-элементного анализа ANSYS в сочетании с методами робастной оптимизации, что позволяет получить оптимизированную геометрию проточной части насоса, обеспечивающую максимальную гидродинамическую эффективность с учетом возможных отклонений факторов

Ключевые слова: оптимизация, ANSYS, параметрическое моделирование, гидродинамические процессы

Введение

На этапе разработки технического задания (ТЗ), в результате решения задачи идентификации расчетного алгоритма на насосе-прототипе формируется работоспособная методика расчета. В дальнейшем методика используется для предварительной расчетной проработки возможности создания насоса согласно параметрам, заданным в ТЗ на разработку.

На этапе эскизного проектирования проводится комплекс исследовательских испытаний, количество которых зависит от «новизны» проектируемого насоса и от возможности использования максимального количества готовых решений из известных конструкций для подобных или близких к подобным насосам.

При исследовательских испытаниях решаются следующие задачи: исследования структуры потока в элементах насосов; исследования внешних характеристик (гидродинамических критериев) опытных насосов; исследования вибрационных характеристик; исследования кавитационно-эрозийных характеристик элементов проточной части; исследование и моделирование пульсаций давления в насосах.

Проводимая на этапе опытной эксплуатации оптимизационная доводка представляет собой комплекс решений, базирующихся на основе теоретических положений, использования подобных конструктивов других насосов, «случайных» изменений геометрических характеристик и т.д.

Примерный алгоритм доводки состоит из следующих шагов:

- верификация расчетных моделей по результатам гидравлических испытаний; идентификация математической модели;

- разработка усовершенствованной методики расчета и оптимизации магистральных нефтяных насосов; назначение варьируемых параметров, определяющих геометрию элементов проточной части, и диапазонов их изменения; формирование оптимизационных математических моделей гидродинамических процессов в проточной части магистральных нефтяных насосов для отдельных элементов проточных частей и насосов в целом;

- выполнение оптимизации по множеству критериев для составных частей проточной части насоса и всего насоса как единое целое; многокритериальная оптимизация заключается в генерировании равномерно-распределенной последовательности в факторном пространстве и в проведении расчетов в этих точках и оптимизации перебором; создание проектов насосов, учитывающих результаты, полученные в ходе решения задач оптимизации.

Формализация процесса оптимизационного поиска

Использование возможностей математического моделирования гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса используя возможности программы конечно-элементного анализа ANSYS совместно с методиками нелинейного программирования позволяет получить оптимизированную геометрию проточной части насоса, обеспечивающую максимальную гидродинамическую эффективность.

Считается, что основными элементами проточной части являются подвод, рабочее колесо, в ряде случаев лопаточный направляющий аппарат и отвод насоса. Варьируемыми параметрами для отдельных элементов проточной части могут быть назначены следующие факторы.

Кретинин Александр Валентинович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел 8(473) 252-34-52, e-mail avk-vrn@mail.ru

Галдин Дмитрий Николаевич – ВГТУ, ассистент, тел. 8(473) 252-34-52, e-mail: dmgaldin@yandex.ru

Шматов Дмитрий Павлович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 234-64-84, e-mail: shmdm@ya.ru

Для рабочего колеса: число лопаток; угол установки лопатки на входе по покрывному диску; угол установки лопатки на выходе из рабочего колеса; коэффициент прочностного запаса вала насоса; коэффициент соотношения диаметру вала к диаметра ступицы; отношение толщины лопатки к диаметру рабочего колеса на выходе.

Для лопаточного направляющего аппарата (НА): количество лопаток; угол изгиба лопатки на входе; угол изгиба лопатки на выходе; толщина лопатки; внешний диаметр НА; внутренний диаметр НА; ширина НА.

Для отвода насоса: ширина проточной части на входе; диаметр на входе; коэффициент диффузорности; коэффициент расширения для переводного канала; угол установки "языка" отвода; пропускная характеристика спиральной части.

Задача оптимизации проточной части является задачей многокритериальной условной оптимизации, при этом ограничения являются кавитационный запас и конструктивные параметры, а критериями оптимизации являются гидравлический КПД насоса, кавитационный запас и радиальная сила на ротор.

Робастный анализ

Случайные отличия геометрических размеров и формы компонентов насосных агрегатов, обусловленные технологией изготовления и качеством проведения обработки поверхностей (дефекты литья, отклонение геометрии проточной части от чертежей, различия толщин лопаток, диаметров на входе и выходе, щелей в уплотнениях, завышенная шероховатость и наплывы в проточной части и т.д.), приводят к различиям между фактическими характеристиками и паспортными.

В проточной части насосного агрегата наибольшее влияние оказывают следующие отклонения: наружного диаметра колеса, ширины выходного канала, угла выхода лопатки, толщины лопатки на выходе, расстояния от «языка» отвода до рабочего колеса, геометрия языка, площадь сечения спиральной части отвода.

Робастный анализ (*Robust Design* – надежное проектирование) основывается на двух положениях:

1. Исследование физических моделей агрегатов с целью получения экспериментальных данных для создания математических моделей.

2. В случае если экспериментальные данные не доступны, проводят многопараметрическую обработку результатов, полученных в ходе расчетов, с исследованием зависимостей показателей агрегата при решении установленной задачи.

Базой для описанных положений является статистическая обработка полученных результатов.

Робастное проектирование позволяет снизить чувствительность функциональности изделия к разбросу случайных величин. В результате достигается:

- снижение зависимостей от случайных параметров;
- повышение допустимых отклонений при производстве компонентов;
- создание более надёжной конструкции;
- учет различий входных параметров.

Рассмотрим пример построение расчетного блока для недетерминированного анализа с использованием встроенного инструмента DesignXplorer “Анализ 6 сигм”.

По результатам вычислительного эксперимента в ANSYSCFX были получены нейросетевые зависимости гидравлического КПД насоса и радиальной силы на ротор от углов установки лопасти на входе и выходе для насоса МНН 7500/249

Для формирования зависимостей $\eta_s = f_{NET}(\beta_{1s}, \beta_2)$ и $F_p = f_{NET}(\beta_{1s}, \beta_2)$ была применена типовая структура многослойного персептрона (MLP) со скрытым слоем, выходом и двумя входами. При обучении MLP использовался алгоритм Левенберга-Маркардта. В итоге образованы два персептрона с тремя нейронами в скрытом слое, параметры которых представлены в таблице.

Далее разобрано функционирование сформированного персептрона. Выход сети был рассчитан по следующей формуле

$$y(x) = 3 \sum_{j=1}^3 w_j \sigma_j(x) - b_0, \quad (1)$$

здесь x – вектор входов (в данном случае двухмерный (β_{1s}, β_2)); $\sigma(x)$ – функция активации; b_0 – порог выходного нейрона; j – номер нейрона в скрытом слое; w_j – веса соединений выходного нейрона с j -м нейроном скрытого слоя.

Параметры аппроксимационного персептрона $\eta_c = f_{NET}(\beta_{1s}, \beta_2)$

Номер нейрона j	1	2	3
Порог b_j	1.729297	-1.403757	24.72034
Вес v_{1j}	1.101144	5.311493	18.81839
Вес v_{2j}	0.5139975	-2.289221	46.67931
Вес w_j	-5.073048	0.9236118	0.1368938
Порог b_0	-1.20721		

Логистическая сигмоида используется как функция активации:

$$\sigma_j(x) = \frac{1}{1 + \exp(-t_j(x, b_j))} \quad (2)$$

где b_j – это порог j -го нейрона скрытого слоя, а функция $t_j(x, b_j)$ имеет вид

$$t_j(x, b_j) = \sum_{i=1}^3 v_{ij} x_i - b_j, \quad (3)$$

здесь v_{ij} – вес соединения j -го нейрона скрытого слоя с i -м входом.

При использовании параметров персептрона, входные переменные приводятся в диапазон $[0;1]$ согласно следующим минимаксным формулам:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0.1142857 \cdot \beta_{1s} - 1.328571; \\ x_2 &= 0.1142857 \cdot \beta_2 - 2.014286. \end{aligned} \quad (4)$$

Используя формулу (1) определяем выход сети, объединенный с искомым значением гидравлического КПД следующей зависимостью

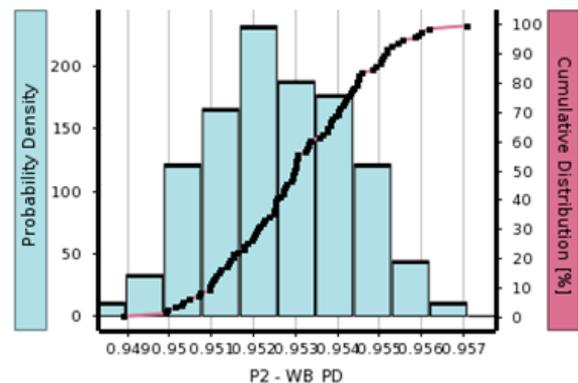
$$\eta_c = \frac{(y(x) + 43.36238)}{46.60267} \quad (5)$$

Из чего следует, что в результате численного эксперимента получена нейросетевая поверхность отклика $\eta_c = f_{NET}(\beta_{1s}, \beta_2)$, достоверная при $\beta_{1s} \in [11; 21]$, $\beta_2 \in [17; 27]$. Высокое значение точности приближения даёт возможность использовать нейросетевую аппроксимационную зависимость в качестве имитационной модели для прогнозирования гидравлического КПД проектируемого центробежного насоса.

Недетерминированный расчет проводился в предположении, что угол лопасти на входе является нормальной случайной величиной, математическое ожидание равно 12.284 градуса, среднеквадратичное отклонение равно

0.6142. Для угла лопасти на выходе принималось: математическое ожидание равно 19.198 градуса, среднеквадратичное отклонение равно 0.9599. По завершению расчетов видно, что при математическом ожидании КПД равно 0.95304 КПД может варьироваться в пределах от 0.9458 до 0.95811, т.е. разброс составляет около 1.4 % по КПД. На рисунке приведены параметры распределения КПД насоса.

Calculated Minimum	0.9458
Calculated Maximum	0.95811
Statistics	
Probability Table	Quantile-Percentile
Mean	0.95304
Standard Deviation	0.0016388
Skewness	-0.0040538
Kurtosis	-0.42407
Shannon Entropy (Complexity)	-4.9902
Signal-Noise Ratio (Smaller is Better)	0.41772
Signal-Noise Ratio (Nominal is Best)	55.292
Signal-Noise Ratio (Larger is Better)	-0.41777
Sigma Minimum	-2.462
Sigma Maximum	2.462



Параметры распределения выходного параметра - КПД насоса

Заключение

В ходе опытной эксплуатации (доводке) производится: составление банка 3D-моделей компонентов конструкции опытного образца; сравнение данных полученных в результате конечно-элементного расчёта с экспериментальными данными опытной эксплуатации насосного агрегата; определение численных моделей по расчету внешних характеристик опытного насоса; формирование улучшенной методики расчета..

Во время этапа опытной эксплуатации опытного образца насоса выполняется:

- создание базы альтернативных вариантов конструкций компонентов проточной ча-

сти насосного агрегата (геометрий подводов, профилей лопаток рабочих колес, отводов) с рассчитанными критериями эффективности функционирования (кавитационный запас, КПД, радиальная сила воздействующая на ротор), соответствующих требованиям Парето-оптимальности, то есть выполняется такое требование, что для каждого варианта конструкции проточной части невозможно подобрать другого, который приводил бы к всех критериев одновременно. В случае возникновения осложнений опытной эксплуатации, связанных с несоответствием по какому-либо критерию, инженеру-конструктору доступен альтернативный вариант для решения этих проблем;

- Создание базы оптимизационных математических моделей ключевых компонентов проточной части насосных агрегатов, учитывающих технологические погрешности, которые могут возникнуть в процессе изготовления (т.н. стохастические алгоритмы), основанных на методах компьютерной динамики жидкости и на методах нелинейной оптимизации. Выполнение робастной оптимизации, т.е. определение параметров компонентов конструкции проточной части, которые обеспечивают заданную эффективность насоса, «нечувствительных» к допустимым дефектам при изготовлении. Во время этапа технического проектирования проведение робастной оптимизации невозможно ввиду недоступности статистических данных об имеющихся технологических погрешностях до появления опытного образца.

Воронежский государственный технический университет

NON-DETERMINISTIC SIMULATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES WITH USE OF ANSYS DESIGNXPLORER MODULE

A.V. Kretinin, D.N. Galdin, D.P. Shmatov

Use the opportunities of mathematical modeling of hydrodynamic processes in turbine setting of the of the centrifugal pump by means of the package of finite element analysis ANSYS in conjunction with methods of nonlinear programming allows to the optimized geometry of turbine setting, which provides maximum power efficiency of the pump

Key words: optimization, ANSYS, parametric modeling, hydrodynamic processes

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта "Создание высокотехнологичного производства магистральных нефтяных насосов нового поколения с использованием методов многокритериальной оптимизации и уникальной экспериментальной базы" (Договор № 02G25.31.0100)

Литература

1. Валухов С.Г., Булыгин Ю.А., Кретинин А.В. Численное моделирование гидродинамических процессов в проточной части магистрального нефтяного насоса // Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе: Труды VI Международной научно-технической конференции «СИНТ'11». – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – С.61-65

2. Валухов С.Г., Кретинин А.В. Математическое моделирование гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса с использованием нейросетевых алгоритмов / Насосы. Турбины. Системы. 2011, № 1. С. 53-60.

3. Sergey Valyuhov, Alexander Kretinin and Alexander Burakov (2011). Neural Network Modeling of Hydrodynamics Processes, Hydrodynamics - Optimizing Methods and Tools, Harry Edmar Schulz (Ed.), ISBN: 978-953-307-712-3, InTech, Available from:

<http://www.intechopen.com/articles/show/title/neural-network-modeling-of-hydrodynamics-processes>

4. Валухов С.Г., Кретинин А.В. Оптимизация геометрии рабочего колеса центробежного нефтяного насоса с использованием инструментов ANSYS // Материалы международной конференции "Воронежская зимняя математическая школа С.Г. Крейна -2014". - Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. – С. 76-83

5. Валухов С.Г., Кретинин А.В., Галдин Д.Н., Баранов С.С. Оптимизационное проектирование проточной части магистрального нефтяного насоса с использованием turbo инструментов ANSYS / Насосы. Турбины. Системы. 2015, № 1. С. 56-70.

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА БАЗЕ НЕЧЁТКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В.Л. Бурковский, В.Н. Крысанов, А.Л. Руцков, Шукур Омар Шукур Махмуд

В статье рассматривается модель анализа функционирования ЭЭС и прогнозирования уровня потребления электроэнергии с помощью нечёткой нейронной сети

Ключевые слова: электроэнергетическая система, модель анализа и прогнозирования в ЭЭС, нечёткая нейронная сеть

Энергетические системы относят к классу распределённых объектов, что необходимо учитывать при создании и модернизации комплекса средств аппаратно-программной реализации автоматизированных систем управления. Развитием данного направления является разработка интегрированных автоматизированных систем управления энергопотреблением (АСУЭ). Основным функциональным ядром АСУЭ является автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ), реализующая функцию оптимизации в режиме реального времени ЭЭС, в частности, по перераспределению энергоресурсов, выработке управляющих воздействий для характерных отклонений фактического режима функционирования от планового.

В работах [1] рассмотрена постановка задач оптимизации элементов электроснабжения в условиях неопределённости. По мнению авторов, результаты этого исследования наиболее перспективно рассматривать в контексте функционального подхода совместно с описанием ЭЭС посредством применения искусственных нечётких нейронных сетей (ННС).

Текущее состояние ЭЭС контролируется по данным телеизмерений. Вектор значений телеизмерений $V(t)$ можно представить в виде суммы истинных значений контролируемых величин – $V(Z(t))$ и вектора ошибок – $\xi_V(Z(t))$ ($Z(t)$ - вектор параметров электрической цепи)[2]:

$$V=V(Z(t))+\xi_V \tag{1}$$

Тогда состояние ЭЭС можно описать моделью вида:

$$X_{t+1}=X_t+T(X_t,H_k)\cdot R_k+G(X_t,H_k)\cdot \xi_k, \tag{2}$$

где X_{t+1} - вектор состояния ЭЭС в дискрет времени t+1; X_t - вектор состояния ЭЭС в дискрет времени t; R_k - вектор управляющих воздействий; ξ_k - последовательность случайных величин; H_k -матрица параметров электрической сети; T, G - соответствующие матрицы.

Данные выражения (1) - (2) представляют собой обобщённую модель ЭЭС. Вектором входных данных в режиме реального времени в рамках процедуры идентификации параметров модели электрической сети являются координаты вектора измерений – $V(t)$ и текущие оценки вектора состояний – X_{k+1} . Эти величины содержат случайные ошибки, которые влияют на точность результатов идентификации.

При этом, необходимо учитывать наличие функции ущерба, посредством которой становится возможен наиболее точный учёт и компенсация неопределённых величин в структуре модели энергосистемы. Данная функция обеспечивает нахождение дополнительных издержек, возникающих при отклонении параметров режима от оптимальных значений. Принимая I^T за фактические издержки при производстве электроэнергии, а $I_{мон}^T$ за издержки условного топлива при заданном способе, функцию ущерба для ЭЭС можно представить в виде (3):

$$\sum_j Y_j = I^T - I_{мон}^T = I^T - \sum_i u_i \cdot B_i^T, \tag{3}$$

где $\sum_j Y_j$ – ущерб у j – го субъекта ЭЭС;

B_i^T – расход удельного топлива i – тым источ-

Бурковский Виктор Леонидович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvl@vorstu.ru

Крысанов Валерий Николаевич - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8–920–228–56–06, e-mail: sovteh2000@mail.ru

Руцков Алексей Леонидович - ВГТУ, аспирант, тел. 8–952–540–98–89, e-mail: alex_8_90@mail.ru

Шукур Омар Шукур Махмуд - ВГТУ, аспирант, e-mail: shukurmakmud@mail.ru

ником генерации за период T ; u_i – цена удельного топлива.

При формировании модели ЭЭС следует учитывать также цикличность трендов нагрузки: часовую, суточную, недельную, месячную, сезонную, годовую. Особенно актуальны суточные модели, что объясняется необходимостью учёта в рамках 24 часового интервала всех описанных типов периодичности.

Для управления в реальном времени [3,4] наиболее адекватной моделью является модель вида (4), в которой уравнение динамики ЭЭС даётся для последовательных моментов времени, а матрица перехода от k -го к $(k+1)$ – моменту времени является функцией момента цикла и различна в период подъёма, пика, спада и провала нагрузок:

$$X_{k+1} = \Phi(k)X_k + \xi_{\phi}, \quad (4)$$

где матрица $\Phi(k)$ априори задана для каждого момента (или же, для характерных участков) графика нагрузок.

Модель (4), во-первых, удовлетворяет требованиям марковости, и, во-вторых, хорошо соответствует физике явления, так как график нагрузок имеет характерные периоды динамики.

Если X_k – вектор активных и реактивных нагрузок узлов, то матрица $\Phi(k)$, обозначаемая в этом случае Φ_S , может быть либо диагональной, либо близкой к ней (недиагональные элементы возникают вследствие зависимости изменения реактивной мощности от активной). Когда элементы $-X_k$ модули и фазы напряжений узлов, матрица, обозначаемая в данном случае через Φ_U , будет диагональной и может быть получена путём преобразования:

$$\Phi_U = \frac{\partial X}{\partial S_k} \Phi_S \left(\frac{\partial X}{\partial S_k} \right)^T. \quad (5)$$

Суть функционального подхода, применительно к рассматриваемой модели (4) заключается в формировании характеристик подсистем с целью их дальнейшего совместного решения с учётом граничных условий, факторов оптимизации (критериев качества) работы ЭЭС.

Первостепенной при решении вопросов оптимизации режимов ЭЭС является задача прогнозирования параметров расчётной модели (величина потребления электроэнергии, используемой мощности). Ошибки в данном процессе проявляются в увеличении издержек при производстве электроэнергии – нерациональном использовании ресурсов, износе оборудо-

вания, значительном росте тарифов на неоптимально выработанный объём электроэнергии и мощности и, как следствие, ведут к росту капитальных затрат на данный сегмент.

Рассмотрим модель прогнозирования потребления электроэнергии (на примере Воронежской энергосистемы – Воронежское РДУ).

В основу модели прогнозирования потребления положено функциональное математическое описание на базе (4): $X_{k+1} = \Phi(k)X_k + \xi_{\phi}$, где X_k – величина потребления прошлых временных периодов, $\Phi(k)$ – корректирующая регрессионная зависимость графиков нагрузок (БД величины потребления прошлых периодов) $-X_k$; ξ_{ϕ} – вектор учёта случайной составляющей.

Представим вектор учёта случайных составляющих в виде:

$$\xi_{\phi} = \pm(\xi_T + \xi_O), \quad (6)$$

где ξ_T – величина влияния на потребление отклонения температуры от сезонной кривой; ξ_O – величина влияния на потребление уровня суточной освещённости.

При этом, за базисное значение $-X_k$, принимается средняя величина за определённый период сбора информации в БД системы прогнозирования. Температуру окружающей среды можно представить в виде двух компонент:

$$T(k) = F_{S_k} + \xi_T, \quad (7)$$

где F_{S_k} – сезонная кривая температуры, которая может быть представлена полиномом Фурье, k – номер дня в году.

Показатель освещённости каждого дня складывается из длины светового дня и плотности облачного покрова. Так как длина светового дня из года в год одинакова для конкретных суток, то можно заключить, что изменение влияния освещённости является функцией состояния облачного покрова:

$$Q(k) = Q_{S_k} - \xi_O, \quad (8)$$

где Q_{S_k} – сезонная кривая длины светового дня.

Следует также отметить инерционный характер влияния метеофакторов на нагрузку энергосистемы. Это можно объяснить тепловой изоляцией жилых и производственных помещений, задержками в функционировании систем отопления и кондиционирования воздуха.

Методы оценки текущего состояния вынуждены в некоторой форме учитывать неточную (слабоформализованную) информацию, а потому требуют применения специального

статистического аппарата. В существующих системах, как правило, применяется метод Ньютона – Рафсона. Сложность заключается в том, что параметры ЭЭС, рассматриваемые во многих приложениях как независимые, на самом деле взаимно коррелированы.

В связи с этим, в настоящее время многие авторы отмечают [5], что совместно с моделями, использующими строгие математические методы оценивания параметров ошибок (входящих, к примеру, в выражение (4)), перспективным и находящим себе практическое применение во многих областях, является использование методов, решающих подобную задачу с использованием эвристических подходов [6]. К ним относится аппарат нечёткой логики, нейронных сетей и экспертных систем.

Данный аппарат базируется на использовании имеющихся чётких функциональных зависимостей совместно с аппроксимацией трудноформализуемых факторов [7]. Рассмотрим возможности реализации ННС в модели (4).

Для этого применим реализацию структуры ННС типа Мамдани:

$$R^k : \text{если } x(t-1) \text{ есть } X_1^k, \quad (9)$$

$$x(t-r) \text{ есть } X_r^k, \text{ то } y(t) = a^k, k = 1, k$$

где R^k - набор правил; x - входные, $y(t)$ - выходная переменная системы; a^k - константа, выражающая соответствие выходной величины взвешенному воздействию входных величин.

Подобный выбор обусловлен высокими точностными показателями данного подхода –

с одной стороны, и простотой дальнейшего использования нормированного выходного сигнала – с другой. Кроме того, в терминах лингвистических переменных в соответствии с выражением (9), возможно корректное представление (4) [8].

Ниже предлагается алгоритм формирования модели прогнозирования потребления и генерации потребления электроэнергии (на рис. 1 представлена структурная схема системы, реализующей данный алгоритм):

Шаг 1. Сбор текущих измерений параметров ЭЭС.

Шаг 2. Оценка текущих параметров.

Шаг 3. Формирование базы данных предыдущих периодов.

Шаг 4. Фаззификация исходных данных – БД исходных периодов, прогноза температуры окружающей среды и освещённости.

Шаг 5. Нормирование и вычисление посредством ИНС выходного значения прогноза потребления электроэнергии.

Шаг 6. Дефаззификация величины прогноза потребления электроэнергии.

Шаг 7. Фаззификация исходных данных для ННС прогноза генерации – БД предыдущих периодов и величины прогноза потребления электроэнергии.

Шаг 8. Нормирование и вычисление посредством ИНС выходного значения прогноза выработки электроэнергии.

Шаг 9. Дефаззификация величины прогноза выработки электроэнергии.

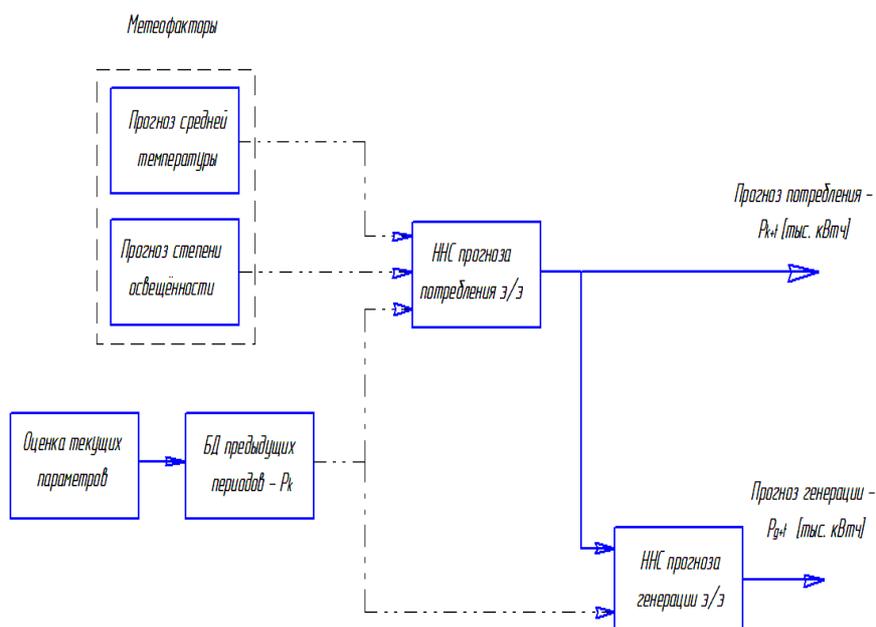


Рис. 1. Структурная схема системы на базе ННС для прогнозирования потребления и генерации электроэнергии

При составлении строки значений температурного фактора, в качестве базового значения примем разницу оптимальной температуры (18°C) и средней температуры выборки рассматриваемой последовательности (за последние 10 лет). Оптимальная температура – величина, при которой можно говорить о наименьшем влиянии климатического фактора на рассматриваемую зависимость. Крайне негативный климатический фактор – ситуация, когда температура окружающей среды отличается от оптимальной более чем в 2 раза.

Базовое значение потребления э/э соответствует параметру для января 2010 года.

Моделирование рассматриваемого процесса прогнозирования потребления э/э производилось при помощи пакета Matlab. Структура нейронной сети: 2 – 10 (5/5) – 25 – 1. Термы принадлежности – гауссовского типа (gaussmf), терм выхода – линейризованная величина (linear). Количество эпох обучения сети – 200. База правил приведена в табл. 1.

Результаты моделирования для июня и декабря 2014 года представлены на рис. 2,3. Они демонстрируют сравнение месячного прогноза потребления электроэнергии методами коэффициента роста/спада и ННС. Показатели обеих моделей при этом сведены в табл. 2.

Таблица 1

База правил ННС (25 вариантов)		Характеристика степени влияния фактора								
Факторы в нормированном выражении	$Q(k)$ – фактор освещённости	крайне негативный (0,1-0,2)	..	Умеренно-негативный (0,2-0,75)	..	средний (0,75-1,15)	..	высокий (1,15-1,25)	..	крайне высокий (1,1-1,)
	$T(k)$ – фактор величины средней температуры	крайне негативный (0,1-0,2)	..	крайне негативный (0,1-0,2)	..	крайне негативный (0,1-0,2)	..	крайне негативный (0,1-0,2)	..	крайне негативный (0,1-0,2)
Потребление э/э в нормированном выражении	P^* Прогнозное	крайне низкое1 (0-0,1)	..	низкое1 (0,1-0,75)	..	среднее1 (0,65-1,25)	..	высокое1 (0,6-1,5)	..	крайне высокое1 (0,8-2,0)

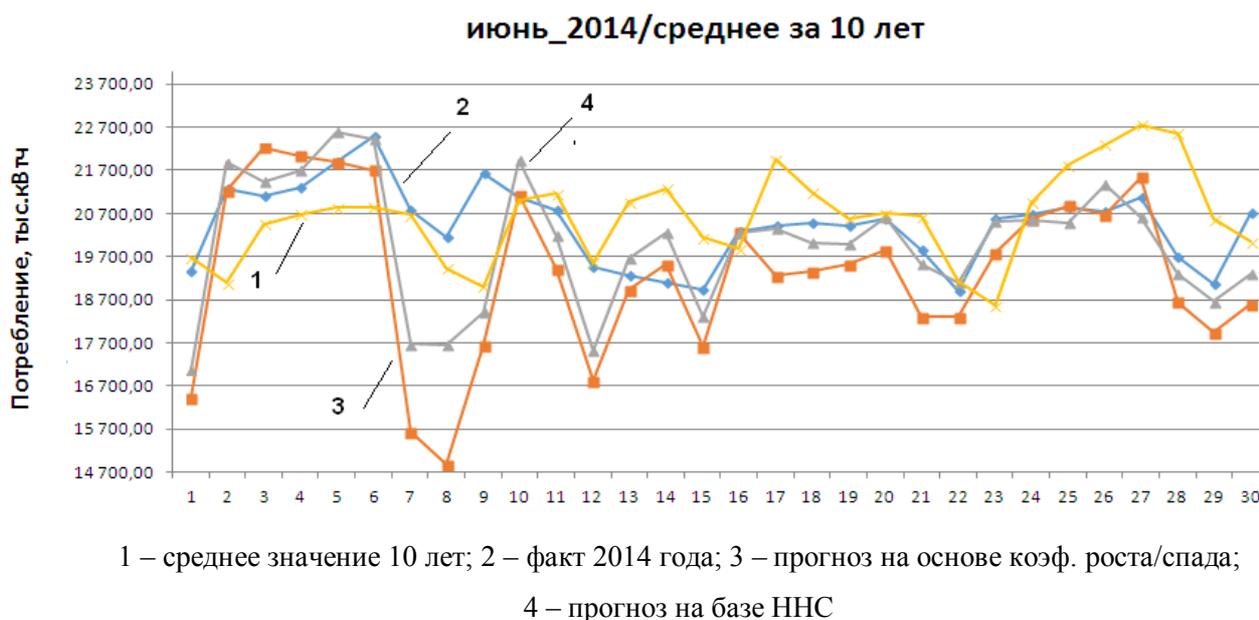
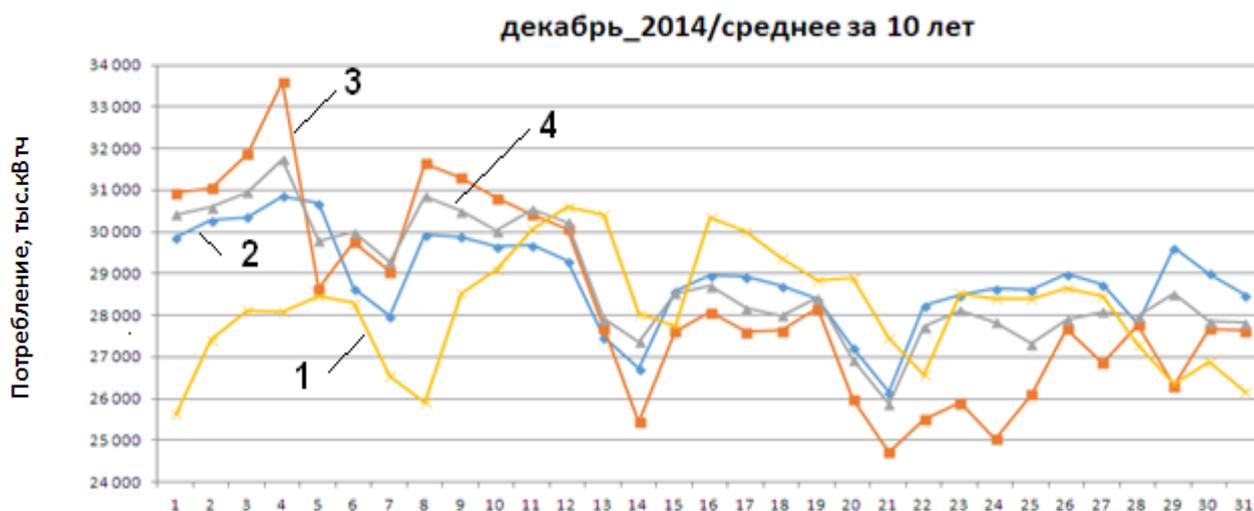


Рис. 2. Графики потребления электроэнергии (июнь): факт среднего значения за 10 лет, факт текущего периода и прогнозные значения текущего периода (методы коэффициентов роста / ННС)



1 – среднее значение 10 лет; 2 – факт 2014 года; 3 – прогноз на основе коэф. роста/спада;
4 – прогноз на базе ННС

Рис. 3. Графики потребления электроэнергии (декабрь): факт среднего значения за 10 лет, факт текущего периода и прогнозные значения текущего периода (методы коэффициентов роста / ННС)

Таблица 2

Анализ месячного прогнозирования выработки/потребления электроэнергии

Показатель	Факт	Метод		Факт	Метод	
		июнь 2014 г.		декабрь 2014 г.		
		коэф.	ННС		коэф.	ННС
Значение, тыс. кВтч	612 935	580724	599314	894 893	878504	894028
Абсолютное отклонение от факта 2014 г., тыс. кВтч	-	32211	13621	-	16389	865
Отклонение от факта 2014 г., %	-	5,26	2,22	-	1,83	0,09

Применение методов ННС (сеть на основе алгоритма Мамдани) для создания моделей управления региональными системами электроснабжения (в частности, для решения вопросов прогнозирования потребления и генерации электроэнергии) позволяет повысить точность процесса до величины 0,09 – 2,22 % за счёт более полного учёта не только циклических, но и слабоформализуемых составляющих.

Модификации ННС обладают лучшими адаптационными способностями к изменениям технико-экономических и климатических параметров, что наглядно видно из сравнения со статистическим методом коэффициента роста/спада потребления, применяемым для пред-

варительного диспетчерского графика в настоящее время. Данное обстоятельство позволяет говорить о высокой потенциальной способности рассмотренного класса моделей в структуре современных ЭЭС на базе концепции Smart Grid [9].

Литература

1. Бурковский, В.Л. Автоматизация принятия решения в слабо структурированных и трудно формализуемых системах на основе интегрированной экспертной системы [Текст] / В.Л. Бурковский, В.Н. Назаров, С. Назарчук // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2001. - Вып. 8.1.

2. Алимов Ю.И., Гамм А.З., Ополева Г.Н. Информационное обеспечение диспетчерского управления в элек-

троэнергетике. - Ново-сибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1985. - 223 с.

3. Бурковский В.Л. Модели оптимального энергораспределения в системах регионального энергопотребления / В.Л. Бурковский, Р.А. Харченко. – Воронеж: В Г ТУ, 2006 – 137с.

4. Бурковский В.Л. Математическая модель оптимизации загрузки автотрансформаторов в системообразующей электрической сети [Текст] / В.Л. Бурковский, Б.Г. Винников, В.В. Картавцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т.5 – № 8-1. – С. 163-165.

5. Скороходов М.Г., Шукур Омар Шукур Махмуд, Бурковский В.Л. Управление системой генерации электрической энергии на основе аппарата нечёткой логики //

Электротехнические комплексы и системы управления, №2 2014. – С.55 – 59.

6. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для вузов/ В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю.Тюкин.– М.: Высш. шк. 2002. –183 с.: ил.

7. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.

8. Борисов А.Н., Алексеев А.В., Крумберг О.А. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной. Рига: Знание, 1982, 256 с.

9. Крысанов, В.Н. Особенности реализации технологии Smart Grid в региональных системах электроснабжения [Текст] / В.Н. Крысанов, А.Л. Рутков, Шукур Омар Шукур Махмуд // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т.10 – № 5-1. – С. 92-97.

Воронежский государственный технический университет

MODEL OF FORECASTING OF REGIONAL ENERGY CONSUMPTION ON THE BASIS OF THE INDISTINCT NEURAL NETWORK

V.L. Burkovsky, V.N. Krysanov, A.L. Rutskov, Shukur Omar Shucur Mahmoud

In article the model of the analysis of functioning of EES and forecasting of level of consumption of the electric power by means of an indistinct neural network is considered

Key words: electrical power system, model of the analysis and forecasting in EES, an indistinct neural network

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ ГТУ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РЕЛЬЕФНЫХ РЕБЕР

А.А. Пригожин, С.В. Дахин

Рассматривается возможность применения рельефных рёбер для интенсификации теплопередачи в регенеративных теплообменниках ГТУ. Профилирование поверхности происходило путём устройства трёхмерных углублений различной геометрии (ТЛТ-поверхность). При численном моделировании рёбер с лунками в ряде случаев наблюдался опережающий рост теплоотдачи по сравнению с гидродинамическим сопротивлением

Ключевые слова: профилированное ребро, лунки, смерчеобразные струи, теплопередача, интенсификация

Традиционно регенеративное теплоиспользование применяется в теплотехнологиях, например, в высокотемпературных теплотехнических установках для регенеративного подогрева воздуха и топлива. В котельных установках регенеративный подогрев воздуха, идущего для горения, и питательной воды производится уходящими газами, снижая их температуру и, тем самым, повышая КПД котла. На теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) осуществляется регенеративный подогрев питательной воды паром из регенеративных отборов паровой турбины, за счет чего уменьшается поток теплоты, идущий с паром в конденсатор.

Несмотря на то, что положительный эффект от регенерации теплоты известен давно, данное направление повышения эффективности установок остаётся актуальным. Совершенствуются как термодинамические циклы и технологические схемы, так и теплообменные аппараты.

Особенно важными вопросы регенеративного подогрева являются для газотурбинных (ГТУ) и газопаровых (ГПУ) установок в части повышения их КПД за счёт полезного использования теплоты продуктов сгорания (выхлопа) газовой турбины. Традиционно, повышение термодинамической эффективности ГТУ осуществляется путём увеличения температуры и давления перед турбиной.

Такой подход резко ограничивает возможность реализации регенерации из-за возникающего противоречия:

с одной стороны, даже при малом коэффициенте гидродинамического сопротивления, существуют условия, при которых регенерация может привести к отсутствию полезной работы в установке;

с другой стороны, увеличение давления приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи

от воздуха, при этом относительно малый коэффициент теплоотдачи от выхлопа турбины компенсируется снижением термосопротивления при оребрении поверхности теплообмена, что приводит к увеличению потребной площади теплообмена и гидродинамического сопротивления, тем самым минимизируя эффект от регенерации, особенно сильно это проявляется при коэффициенте регенерации $\mu > 0,7$ [1].

Существуют схемные решения, позволяющие разрешить вышеуказанное противоречие, например в [2] рассматривается устройство регенеративного цикла путем создания контура частичной рециркуляции с малой степенью повышения давления и высокими абсолютными значениями давления на входе и выходе компрессора циркуляционного контура. Преимуществом предлагаемой ГТУ с рециркуляцией продуктов сгорания при высоком давлении является повышение её эффективности без существенных технологических изменений.

Однако, на наш взгляд, определяющим здесь остаётся вопрос интенсификации теплообмена в регенераторах ГТУ.

Предлагается интенсифицировать теплоотдачу на поверхности рёбер α_p со стороны продуктов сгорания. Покажем влияние α_p на изменение площади оребрения на примере плоского прямоугольного ребра расположенного на теплообменной трубке.

Полагаем, что условия гидродинамики и теплообмена внутри трубки не изменяются, стенка трубки тонкая, коэффициент теплоотдачи с внешней стороны трубки $\alpha_c = const$, $\alpha_p = const$ по всей поверхности ребра, ширина ребра $b = const$, может изменяться только длина ребра l , причём избыточная температура торца ребра $\vartheta_l = const$, гидродинамические условия со стороны оребрения неизменны.

Тогда, для обеспечения постоянства коэффициента теплопередачи k_1 при изменении α_p ,

Пригожин Антон Александрович – ИМАТ ВГТУ, лаборант-исследователь, тел. 8(473)234-61-08
Дахин Сергей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: svdakhin@ya.ru, тел. 8(473)243-76-62

необходимо равенство термосопротивлений оребренной стенки

$$\frac{1}{\alpha_{\text{пр}}} \frac{F_1}{F_{\text{рс}}} = \frac{1}{\alpha'_{\text{пр}}} \frac{F_1}{F'_{\text{рс}}}, \quad (1)$$

где $F_1, F_{\text{рс}} = F_p + F_c$ - площадь внутренней поверхности трубки, ребристой стенки, поверхности ребра и внешней поверхности трубки свободной от ребер соответственно, м^2 ; $\alpha_{\text{пр}}$ - приведённый коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; штрих обозначает новое значение.

В рамках принятых условий $\alpha_{\text{пр}}$ существенно зависит только от изменения α_p , при этом изменение площади ребер пропорционально изменению их длины l . Действительно, если

$$\vartheta_l = \frac{1}{ch(ml)}; \quad m = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda\delta}}, \text{ м}^{-1}, \quad (2)$$

то легко получаем:

$$\frac{l}{l'} = \left(\frac{\alpha'_p}{\alpha_p}\right)^{0,5}. \quad (3)$$

Проанализируем влияние интенсификации теплоотдачи на теплообменных ребрах на примере газового регенеративного подогревателя (ГРП) водородной паротурбинной установки (ВПУ) [3].

Конструктивно ГРП представляет собой трехпоточный теплообменный аппарат, в котором один греющий теплоноситель (перегретый пар после турбины) и два нагреваемых теплоносителя (газообразные кислород и водород).

На рис. 1 - 2 показан общий вид и схема движения теплоносителей ГРП.

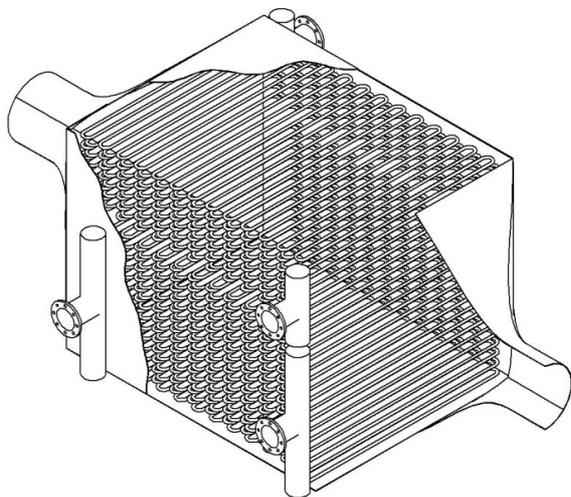


Рис. 1. Общий вид ГРП

Кислород и водород движутся по трубкам с внутренним диаметром $d_s = 10$ мм и толщиной стенки $\delta_c = 1$ мм. Материал стенки трубок – сталь 12Х18Н10Т.

Трубки согнуты в змеевик, который имеет параллельные ходы: для кислорода - 13; для водорода - 27.

Плоскость змеевика горизонтальна. Таким образом, совокупность змеевиков образует трубный пучок, который омывается греющим перегретым паром.

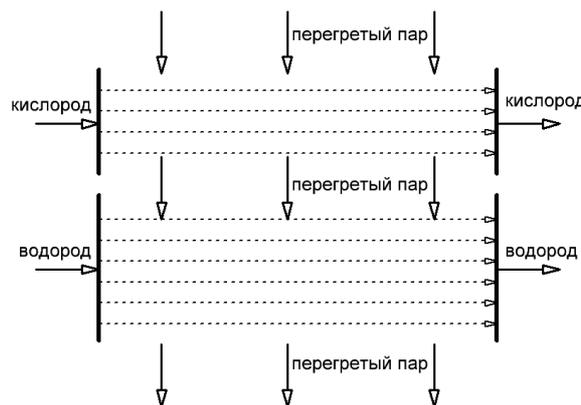


Рис. 2. Схема движения теплоносителей ГРП

В результате расчёта ГРП определена потребная площадь теплообмена $F = 27,5 \text{ м}^2$.

С целью улучшения габаритно-массовых характеристик ГРП предлагается оребрить поверхность труб в пучке теплообменника со стороны пара, т.к. коэффициент теплоотдачи для пара примерно в 10 раз ниже, чем для кислорода и водорода.

Выбираем круглые прямые ребра из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Сравниваются ребра толщиной $\delta_p = 0,1 \div 1,0$ мм, высотой h_p 5 мм и 10 мм, расстояние между ребрами h принималось равным 1, 5 и 10 мм.

Расчёт проводился по методике [4]. Результаты представлены на рис. 3.

Относительная площадь трубного пучка \bar{F} и относительная потеря напора в пучке $\bar{\Delta P}$ определялись как отношение площади или потери напора оребренного пучка к гладкому:

$$\bar{F} = \frac{F_{\text{рп}}}{F_{\text{гл}}}; \quad \bar{\Delta P} = \frac{\Delta P_{\text{рп}}}{\Delta P_{\text{гл}}}. \quad (4)$$

Здесь $F_{\text{рп}}$ и $\Delta P_{\text{рп}}$ приведены к гладкой поверхности.

При расчёте ΔP_{rp} использовалась формула для определения коэффициента гидравлического сопротивления одного ряда в виде

$$\zeta_1 = 5,4 \left(\frac{l''}{d} \right)^{0,3} Re^{-0,25}, \quad (5)$$

где

$$l'' = \frac{F_c}{F_{pc}} d + \frac{F_c}{F_{pc}} \sqrt{\frac{F_p}{2n_p}}, \text{ м};$$

n_p – количество ребер.

Из рис. 3 видно, что могут существовать условия, при которых потребная площадь теплообмена снижается более чем в пять раз при существенно меньшей, или, как минимум, равной потере напора неоребрённых трубок (линии 1 - 4).

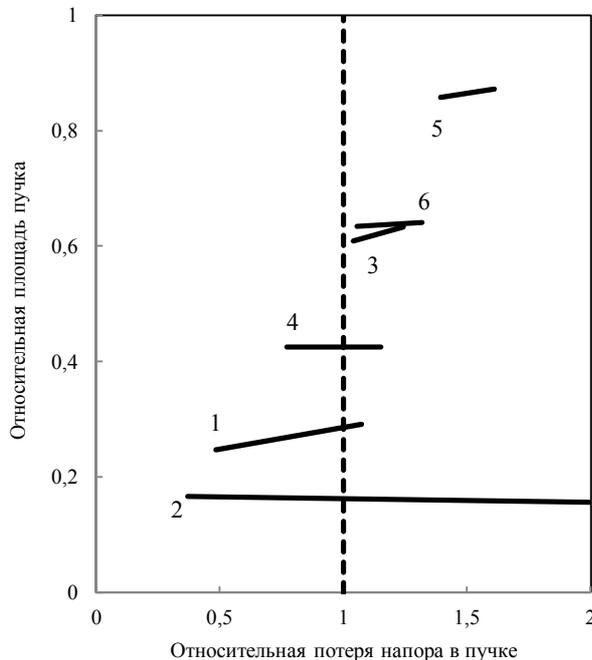


Рис. 3. Относительная потеря напора в пучке $\delta_p = 0,1 \div 1,0$ мм; шаг между ребрами 1 мм: 1 - высота ребра 5 мм; 2 - высота ребра 10 мм; шаг между ребрами 5 мм: 3 - высота ребра 5 мм; 4 - высота ребра 10 мм; шаг между ребрами 10 мм: 5 - высота ребра 5 мм; 6 - высота ребра 10 мм

Из (3) и (5) следует, что при увеличении α_p возможно уменьшение коэффициента гидравлического сопротивления трубного пучка за счёт уменьшения F_p . Одним из способов интенсификации теплоотдачи на поверхности ребра может являться применение ТЛТ-поверхностей для создания смерчеобразных струй. Для этого на поверхности ребра делаются лунки различной геометрии (рис. 4 - 6) [5].

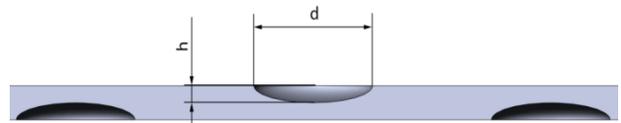


Рис. 4. Геометрия модели с лунками-углублениями, $h/d=1/8$

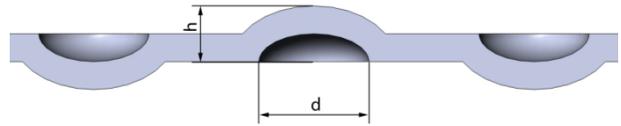


Рис. 5. Геометрия модели со сферическими лунками, $h/d=1/2$

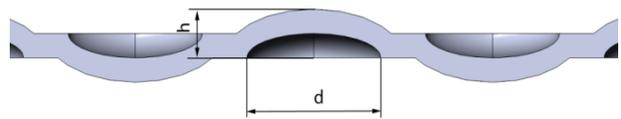


Рис. 6. Геометрия модели с эллиптическими лунками, $h/d=1/3$

Задача решалась в программном комплексе ANSYS CFX в рамках SST-модели. Граничные условия для всех моделей приняты следующими: температура набегающего воздуха $T_{жс} = 300$ К; со стороны теплообменных трубок задано условие первого рода с $T_{mp} = 400$ К; на поверхности пластин задано условие третьего рода. Расчёты проводились для "открытой" и "закрытой" моделей. "Открытая" модель характеризуется свободным прохождением охлаждающего воздуха через боковые и заднюю грань расчетной области. У "закрытой" модели боковые грани не проницаемы.

В ходе решения была получена устойчивая сходимость для всех уравнений порядка $5 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-4}$.

На рис. 7 представлены результаты численного моделирования коэффициента теплоотдачи на пластинах для открытой модели при скорости набегающего потока 150 м/с.

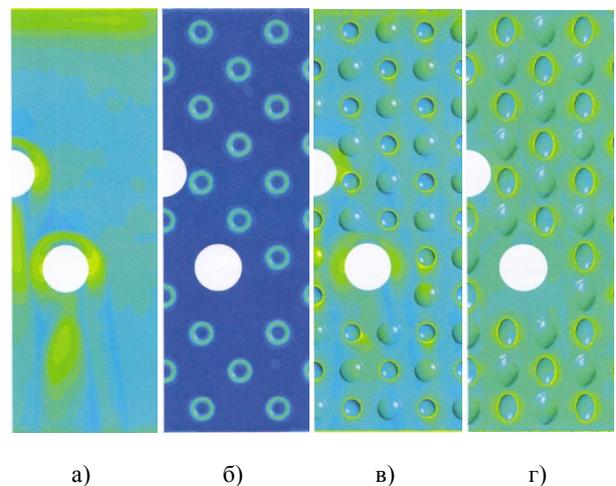


Рис. 7. Коэффициент теплоотдачи для "открытой" модели а) плоская пластина; б) модель с лунками-углублениями; в) модель со сферическими лунками; г) модель с эллиптическими лунками

Сравнение вариантов "олунения" плоских ребер показывает, что величина среднего по поверхности коэффициента теплоотдачи максимальна для модели с лунками углублениями и минимальна для модели со сферическими лунками. Но для всех моделей теплоотдача выше, чем на плоской пластине. В таблице приведены численные значения среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_p$ и потери давления $\overline{\Delta P}'_p$, отнесённые к соответствующим величинам на плоском ребре.

Модель, "открытая"/"закрытая" (обозначения как на рис. 7)	б)	в)	г)
$\bar{\alpha}_p = \frac{\bar{\alpha}_l}{\bar{\alpha}_{пл}}$	2,86	1,14	2,57/1,9
$\overline{\Delta P}'_p = \frac{\overline{\Delta P}'_{p,l}}{\overline{\Delta P}'_{p,пл}}$	1,19	1,44	1,54

Рассмотрим возможные результаты применения "олунённых" ребер в конструкции рассмотренного выше ГРП на примере ребер толщиной 0,5 мм с нанесёнными лунками-углублениями.

Из (3) получаем оценку уменьшения длины ребра

$$\frac{l}{l'} = \left(\frac{\alpha'_p}{\alpha_p}\right)^{0,5} = 2,86^{0,5} = 1,69,$$

тогда с учётом (5) $\overline{\Delta P}$ уменьшится на 6 %.

Институт машиностроения и аэрокосмической техники Воронежского государственного технического университета
Воронежский государственный технический университет

INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN REGENERATIVE HEAT EXCHANGERS STU IN THE APPLICATION OF RELIEF EDGES

A.A. Prigozhin, S.V. Dakhin

Describes the application of relief edges to the intensification of heat transfer in regenerative heat exchangers of gas turbine plants. Profiling surface occurred through three-dimensional cavities of various geometries (TLJT-surface). In numerical simulations of ribs with holes in a number of cases there was outstripping growth of heat transfer in comparison with the hydrodynamic resistance

Key words: profiled edge, wells, tornado, heat transfer, intensification

Таким образом, организация лунок различной формы на теплообменных ребрах при оптимальных соотношениях гидродинамика-геометрия, позволит снизить габаритно-массовые характеристики регенеративного теплообменника.

Работа выполнена в рамках исполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Стационарные газотурбинные установки / Л. В. Арсеньев, В.Г. Тырышкин, И.А. Богов; Под ред. Л.В. Арсеньева и В.Г. Тырышкина. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1989. - 543 с.
2. Ходус, В.В. Высокоэффективный регенеративный цикл ГТУ с рециркуляцией продуктов сгорания при высоком давлении [Текст] / В.В. Ходус // Теплоэнергетика. - 2010. - № 2. - С. 7 - 11.
3. Разработка элементов опытной универсальной модульной экологически чистой водородной паротурбинной энергоустановки с механическим приводом на валу мощностью до 5 МВт [Текст] // Отчёт по опытно-конструкторской работе. № гос. регистрации 01201175129.
4. Бажан, П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.И. Селиверстов. - М.: Машиностроение. - 1989. - 367 с.
5. Пригожин, А.А. Влияние профиля поверхности плоского прямого ребра на теплопередачу [Текст] / А.А. Пригожин, И.С. Аношин, С.В. Дахин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2015. - Т. 11. - № 2. - С. 91-95.

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДИВЕРСНОЙ СИСТЕМОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ЗАЩИТЫ БЛОКОВ АЭС

Е.В. Андропов, И.Р. Коган, В.П. Поваров, Л.П. Павлов

Приводится описание реализации применения принципа разнообразия как способа исключения (снижения вероятности) отказа по общей причине в управляющей системе безопасности Нововоронежской АЭС-2

Ключевые слова: отказ по общей причине, программное обеспечение, управляющие системы безопасности, диверсная система защит, алгоритмы защит

Описание проблемы

В проекте АСУ ТП АЭС-2006 используются программируемые технические средства как в управляющих системах безопасности (СБ) так и в системах нормальной эксплуатации (СНЭ). Представление информации на блочном пункте управления (БПУ) реализовано на унифицированных программно-технических средствах системы верхнего блочного уровня (СВБУ). Эти решения обладают рядом преимуществ по сравнению с аналоговой техникой, включая самодиагностику, надежность, повышение точности, доступность в процессе эксплуатации, что облегчают работу оперативного персонала БПУ. Централизация контроля и управления осуществляется с мониторов рабочих станций на БПУ и резервном щите управления (РПУ). При этом резервирование управления с панелей РПУ осуществляется в полном объеме для СБ и в минимально достаточном объеме для СНЭ.

Однако наряду с преимуществами использования программируемых технических средств возрастает тяжесть последствий в случае отказа систем АСУ ТП по общей причине в результате ошибки в программном обеспечении (ПО). Российские и международные нормативные документы однозначно указывают, что надежную защиту от ошибок по общей причине (ООП), связанных с возможными ошибками в ПО,

можно реализовать только на основе принципа разнообразия.

В ВВЭР-2006 не защищены от ООП, вызванных возможными ошибками в ПО иницирующая часть подсистем аварийной и предупредительной защит реактора, которые реализована на одних программно-технических средствах TELEPERM XS (TXS).

Для снижения вероятности отказа по общей причине рекомендуется применять сочетание программируемой непрограммируемой техники [1].

После событий на АЭС Фукусима (Япония) надзорные органы ряда стран существенно ужесточили требования по выполнению действующих НТД в области безопасности АЭС, включая вопросы разнообразия и глубокоэшелонированной защиты.

Согласно проекту АСУ ТП АЭС-2006, управляющая система безопасности по технологическим параметрам (УСБТ) реализована на программируемых технических средствах.

Замечание экспертного заключения ФБУ НТЦ ЯРБ к предварительному отчету обоснования безопасности (ПООБ) НВАЭС-2: «проект аварийной защиты реактора, представленный в ПООБ, в части технических средств не удовлетворяет принципу разнообразия, т.к. иницирующая часть двух комплектов подсистем аварийной и предупредительной защит реактора реализована на одних программно-технических средствах TXS (отступление от требования п. 4.4.5.7 ОПБ-88/97)».

Разнообразие как способ уменьшения вероятности отказа по общей причине

Разнообразие специально создается как защита от ООП. Оно может быть достигнуто наличием систем, которые физически отличаются одна от другой, либо с помощью функционального разнообразия, если

Андропов Евгений Владимирович - ООО «Московский завод «Физприбор», заместитель главного конструктора по программному обеспечению, e-mail: ogk@fizpribor.ru
Коган Исаак Рувимович - АО «Атомэнергопроект», главный технический эксперт, e-mail: kogan_IR@aep.ru
Поваров Владимир Петрович – Нововоронежская АЭС, канд. техн. наук, директор, e-mail: PovarovVP@nvnpp1.rosenergoatom.ru
Павлов Леонид Павлович - Нововоронежская АЭС, главный технолог ТГ, e-mail: PavlovLP@nvnpp1.rosenergoatom.ru

аналогичные системы достигают установленной цели различными путями (ГОСТ Р МЭК 60880-2011 «Атомные электростанции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Программное обеспечение компьютерных систем, выполняющих функции категории А»).

Анализ требований NUREG/CR-7007 «Diversity Strategies for Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems» («Методы обеспечения разнообразия в АСУ ТП АЭС»), с учетом опыта проектирования УСБ АЭС позволяет выделить шесть базовых направлений реализации принципа разнообразия:

- функциональное разнообразие;
- параметрическое разнообразие;
- проектное разнообразие:
 - архитектурное разнообразие,
 - алгоритмическое разнообразие,
- разнообразие, определяемое человеческим фактором;
- аппаратное разнообразие;
- программное разнообразие.

В УСБТ АЭС-2006 реализованы в разной степени все принципы разнообразия, кроме программного разнообразия.

Несмотря на то, что разработка ПО УСБТ была выполнена в соответствии с требованиями стандарта МЭК, 60880 убедительных доказательств невозможности отказа или оценки показателей надёжности ПО разработчиком системы не были представлены.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Оценка программной продукции, надёжность программного обеспечения - это набор атрибутов, относящихся к способности программного обеспечения сохранять свой уровень качества функционирования при установленных условиях за установленный период времени.

Комиссия по ядерному регулированию США выпустила разъяснение, в котором ООП ПО определяется как результат множественных отказов, не выявляемых при проверках, и который надо относить к запроектной аварии (ЗПА).

Для реализации принципа разнообразия, как одного из направлений по преодолению ООП, необходимо наличие независимой от системы АЗ-УСБТ диверсной системы защиты (ДСЗ), реализованной на других технических средствах. Эта система должна обеспечить перевод энергоблока в контролируемое и

безопасное состояние для различных проектных исходных событий.

Решение о применении разнообразия (диверсификации) принималось с учетом положений [2].

«Меры проекта по предотвращению отказа по общей причине связаны с архитектурой систем контроля и управления, которая включает, по крайней мере, две системы контроля и управления, выполняющие функции категории А. Доказательство того, что любая индивидуальная система контроля и управления не имеет ошибок, невозможно, и поэтому существование скрытых дефектов и связанных с ними механизмов срабатывания не может быть исключено в принципе.»

В связи с этим постулирован ООП ПО как запроектная ситуация и принято решение о ее преодолении с вводом в проект диверсной системы защит.

ДСЗ в случае отказа иницирующей части системы АЗ-УСБТ или исполнительной части системы АЗ по общей причине должна обеспечивать выполнение следующих основных функций безопасности при наступлении проектных исходных событий режимов категории 2, 3, 4:

- аварийной остановки реактора и поддержания его в подкритическом состоянии;
- аварийного отвода тепла от реактора;
- удержания радиоактивных веществ в установленных границах.

В настоящей статье рассматривается реализация компенсирующих мероприятий по устранению замечания экспертного заключения путем выполнения части функций на независимой системе защит.

Определение объёма компенсирующих мероприятий

Для определения объёма компенсирующих мероприятий организациями Главного конструктора РУ (ОКБ ГП) и научного руководителя (РНЦ КИ) выполнен анализ исходных событий с наложением ООП, приводящих к ЗПА с наиболее тяжелыми последствиями, с точки зрения выполнения функций безопасности и не удовлетворяющие критериям приёмки для запроектных аварий без плавления топлива. Определены необходимые исполнительные механизмы, работу которых должны инициировать дополнительные сигналы. Разработаны алгоритмы диверсных защит для выполнения всех функций безопасности, действующие на

останов реактора и реализующие функции УСБТ. Выполнены поверочные расчеты последствий развития исходного события с ООП с учётом работы дополнительных алгоритмов ДСЗ и действий персонала.

Всего разработано и обосновано 15 алгоритмов, реализация которых удовлетворяет критериям приёмки, предъявляемых для запроектных аварий без плавления топлива в случае отказа по общей причине проектной СУЗ-УСБТ.

Для исключения рисков, связанных с надёжностью применения других программируемых средств при выполнении принципа разнообразия, было принято решение реализации ДСЗ на непрограммируемых технических средствах.

Расчёт вероятности отказа на требование при совместной работе СУЗ – УСБТ и ДСЗ с учётом отказа ПО в двух комплектах и наложением отказа датчиков или устройств размножения сигналов в одном канале СБ составил $4,74 \cdot 10^{-7}$. Это удовлетворяет требованиям технического задания на СУЗ - УСБТ ($< 5 \cdot 10^{-7}$).

Для двух комплектов программируемых средств УСБТ при проведении расчётов показателей надёжности в соответствии с рекомендациями НТЦ ЯРБ принята вероятность отказа 10^{-5} .

Описание диверсной системы защит

В каждом канале СБ устанавливается по одному одинаковому комплекту ДСЗ. В состав каждого комплекта входят по 3 шкафа комплекса средств автоматизации (КСА) ДСЗ производства ООО «Московский завод Физприбор».

КСА ДСЗ предназначен для:

- ввода и обработки аналоговых и дискретных сигналов от первичных преобразователей (датчиков) и смежных систем (аппаратуры контроля нейтронного потока, панелей БПУ, устройства для гальванической развязки сигналов (УГРС), программно-технических комплексов локальных защит (ПТК ЛЗ) и ТХС) для выдачи сигналов ООП и реализация функций защит на непрограммируемых средствах;

- представления на блочном пункте управления и в СВБУ энергоблока информации о контролируемых параметрах и состоянии частей комплекса с помощью непрограммируемых и программируемых средств.

В каждом шкафу реализован один канал защит с питанием от двух источников: постоянного и переменного тока.

Формирование логики «2 из 3» защит на останов реактора производится двумя выключателями прерывания питания ОР СУЗ по переменному и двумя по постоянному току.

Формирование логики «2 из 3» защит иницирующей части УСБТ производится в шкафах КСА и проводными связями передаются в существующую исполнительную часть УСБТ, ПТК приоритетного управления, (далее ПТК ПУ) на модули приоритетного управления исполнительными механизмами (далее МПУ). Один МПУ управляет одним механизмом. Для исключения отказов МПУ по общей причине, внутри МПУ реализован принцип разнообразия.

Распределение приоритетов выполнения команд защит УСБТ реализованных в МПУ в порядке убывания:

- автоматическое управление от ТХС (штатная работа при отсутствии отказа);
- от ДСЗ (при отказе ТХС (невыдаче команд));
- от ключей БПУ, РПУ;
- от систем управления нормальной эксплуатации.

При срабатывании ДСЗ, также как и при срабатывании ТХС, накладывается запрет на 30 минут на выполнение команд оператора.

Для выполнения команд защит на останов реактора команды от ТХС и ДСЗ равно приоритетны.

В качестве источников аналоговых параметров для ТХС и ДСЗ используются существующие датчики. Для исключения влияния работы ТХС и ДСЗ выполнено гальванически разделённое размножение сигналов на имеющихся в составе СУЗ – УСБТ непрограммируемых модулях гальванического разделения в шкафах УГРС.

Такое решение было принято для обеспечения строгой последовательности работы вначале защиты на ТХС, при отсутствии отказа, затем ДСЗ из-за того, что уставки срабатывания защит ТХС и ДСЗ отличаются незначительно. В случае использования различных датчиков не исключается возможность срабатывания ДСЗ раньше ТХС, что может спровоцировать оператора на неправильные действия.

Например, в СУЗ-УСБТ уставка аварийной защиты по уровню в парогенераторах составляет $H_{ном}-650$ мм, а в ДСЗ $H_{ном}-700$ мм. Отличие составляет менее

трех погрешностей измерения, что при разных датчиках может привести к нарушению последовательности работы систем.

Таким образом основной причиной использования общих датчиков является необходимость обеспечения последовательности срабатывания вначале СУЗ – УСБТ затем ДДСЗ при исправности обеих систем.

При этом в части выполнения функции АЗ системы ДСЗ и СУЗ-УСБТ равно приоритетны. По отношению к управлению системами безопасности приоритет отдан командам СУЗ-УСБТ. В соответствии с алгоритмами ДСЗ формирует команды на обесточивание приводов СУЗ для останова реактора, локализацию гермообъема и ввод в работу системы пассивного отвода тепла (СПОТ).

Реализация функций защиты на непрограммируемых средствах позволяет исключить из рассмотрения непредсказуемую надёжность ПО и влияние на функцию защиты аспектов информационной безопасности. Расчёты надёжности возможны для непрограммируемых технических средств, в том числе с учётом ООП, и невозможны для программного обеспечения.

КСА ДСЗ основывается на следующих инновационных подходах:

- реализация алгоритмов защит на непрограммируемых средствах (логические вентили, счётчики, регистры и др.) без использования микроконтроллеров и ПЛИС любой степени интеграции;

- реализация непрограммируемыми средствами цифровой обработки аналоговых сигналов (преобразование шкал, фильтрация, 50 Гц, демпфирование, линеаризация, компенсация температуры холодного спая, необходимой коррекции значений параметров) посредством табличной обработки на микросхемах энергонезависимой памяти;

- периодическая автоматизированная проверка (опробование) основной доли оборудования, включая проверку алгоритмов, внутрисистемных линий связи, линий связи с исполнительными механизмами непрограммируемыми средствами;

- резервирование (троирование) не только датчиков, но и аппаратных средств реализации алгоритмов защит с возможностью опробования оборудования без вывода его из эксплуатации и без потери функции защит, на работающем энергоблоке;

- наличие внутренней резервированной локальной сети и резервированной сети связи с информационно - управляющей системой энергоблока для выдачи информации о дискретных и аналоговых сигналах, срабатывании системы, состоянии технических средств, при этом невозможность влияния программируемых сетевых средств на средства непрограммируемой логики обеспечивается аппаратно.

Встроенные средства проверки обеспечивают диагностику от выходов датчиков до линий связи с модулями управления исполнительными механизмами, входящими в УСБТ.

Построение системы

Структура системы (рис. 1) предусматривает резервирование (троирование) не только датчиков, но и аппаратных средств реализации алгоритмов с возможностью опробования оборудования без вывода его из эксплуатации и без потери функции защит, на работающем энергоблоке.

Блоки сбора сигналов осуществляют ввод сигналов от датчиков (первичных преобразователей) и смежных систем.

Блоки сбора аналоговых сигналов на непрограммируемых средствах обеспечивают:

- ввод сигналов термодпар, термометров сопротивления, унифицированных токовых сигналов,

- преобразование шкал, фильтрацию помехи промышленной частоты (50 Гц),

- демпфирование (с постоянной времени, настраиваемой в диапазоне 50 мс – 10 с индивидуально для каждого входа блока),

- линеаризацию сигналов по стандартным (или нестандартным по согласованию с заказчиком) номинальным статическим характеристикам термодпар и термометров сопротивлений (тип характеристики и диапазон сигналов задаются индивидуально для каждого входа блока),

- компенсацию температуры холодного спая термодпар, коррекцию уровня;

- сравнение с уставкой на повышение или понижение с регулируемой зоной возврата (зона возврата задаётся индивидуально для каждой уставки и может быть любой в пределах диапазона входных сигналов);

- при необходимости питание датчиков с индивидуальной гальванической развязкой источников питания.

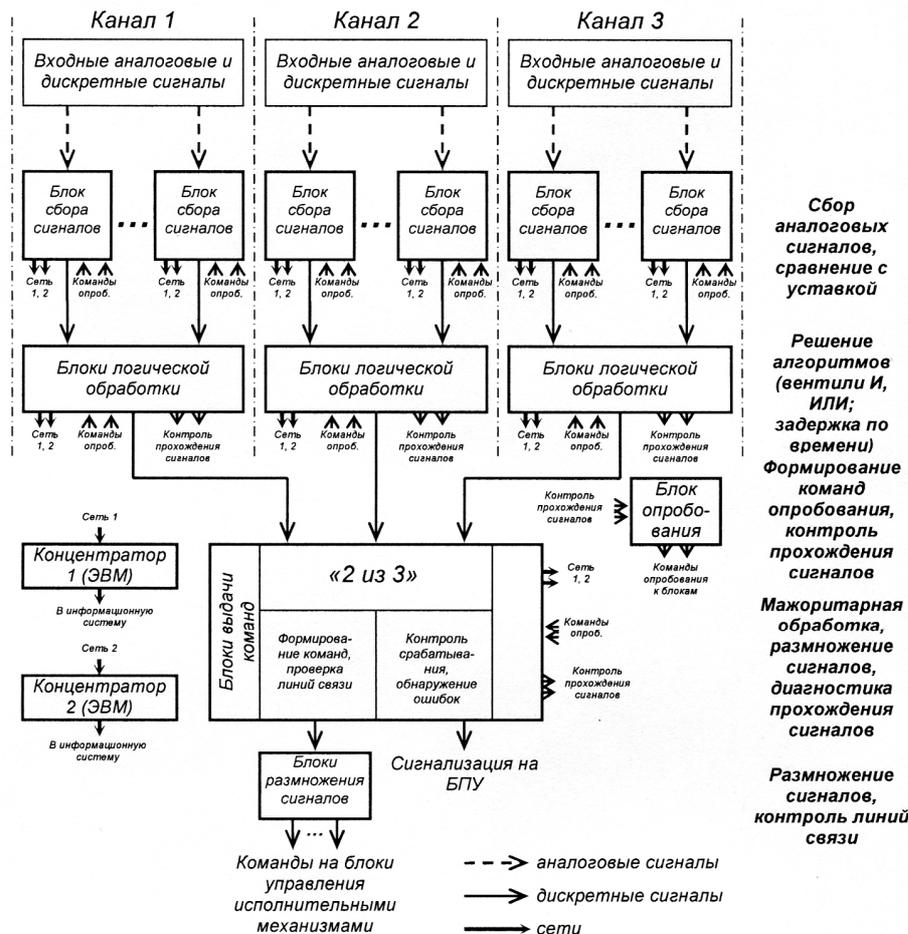


Рис. 1. Структурная схема КСА ДСЗ

Вычисление рассогласований аналоговых сигналов и контроль диапазонов сигналов осуществляются программируемыми средствами с помощью микроконтроллеров функциональных блоков и концентраторов (промышленных ЭВМ).

Сбор дискретных сигналов от аппаратуры контроля нейтронного потока предусматривает ввод сигналов типа «сухой контакт» с обеспечением питания датчиков и мажоритарную обработку по логике «2 из 4».

Логическая обработка сигналов предусматривает:

- мажоритарную обработку по логике «2 из 3» («2 из 4»),
- логические вентили (И, ИЛИ, НЕ),
- выдержку времени.

Каждый из аналоговых сигналов вводится от трёх одноимённых датчиков

в три шкафа ДСЗ. В шкафах ДСЗ (в блоках сбора и обработки унифицированных сигналов тока) каждый сигнал подвергается обработке: фильтрации помехи частотой 50 Гц,

демпфированию, коррекции, компенсации температуры холодного спая, сравнению с уставкой с учётом зоны возврата.

Результаты сравнения с уставкой из каждого шкафа раздаются в два других шкафа и подвергаются в каждом шкафу мажоритарной обработке «2 из 3» (в блоках мажоритарной логики «2 из 3», логической обработке и в блоках управления силовыми ключами) для формирования команды на обесточивание ОР СУЗ. Сформированные команды поступают на силовые ключи – «сухие» контакты (блоки силовых ключей). Указанная обработка реализована в трёх шкафах одинаково. На силовых ключах реализована мажоритарная обработка «2 из 3».

Работа алгоритма ДСЗ

Пример структуры алгоритма ДСЗ по управлению исполнительными механизмами на примере защиты парогенератора показан на рис. 2.

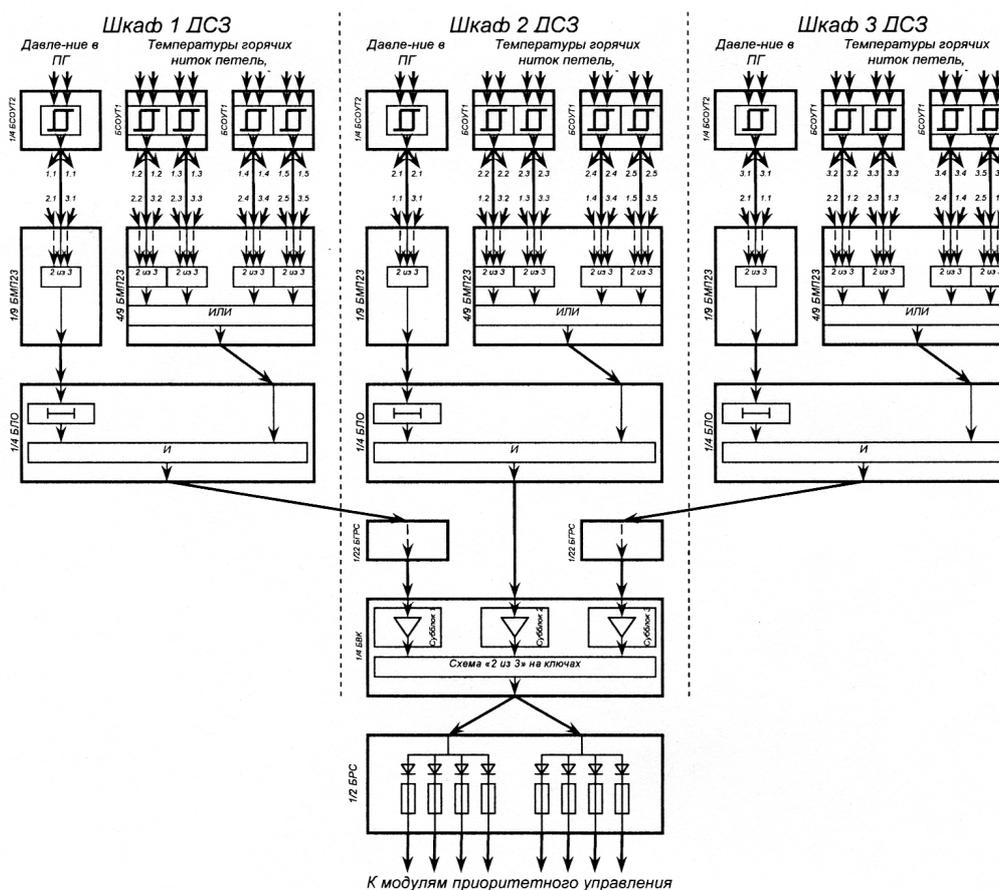


Рис. 2. Структура алгоритма ДСЗ по управлению исполнительными механизмами

Каждый из аналоговых сигналов вводится от трёх одноимённых датчиков в три шкафа ДСЗ. В шкафах ДСЗ каждый сигнал подвергается обработке: фильтрации помехи частотой 50 Гц, демпфированию, коррекции уровня, компенсации температуры холодного спая, сравнению с уставкой с учётом зоны возврата.

Результаты сравнения с уставкой из каждого шкафа раздаются в два других шкафа и подвергаются в каждом шкафу мажоритарной обработке «2 из 3» и логической обработке для формирования команды. Указанная обработка реализована в трёх шкафах одинаково.

Сформированные команды поступают на блоки выдачи команд (БВК). Команда на выходе БВК формируется по логике «2 из 3» на схеме 6 ключей (оптореле). Команда размножается на несколько модулей приоритетного управления (МПУ) на диодном размножителе блоков размножения сигналов БРС. Один выход БРС подключается к одному или более МПУ.

Сбор аналоговых и дискретных сигналов с технических средств комплекса и их выдачу в СВБУ в две взаиморезервирующие локальные сети осуществляют микроконтроллеры, встроенные в функциональные блоки.

Локальные сети работают под управлением двух взаиморезервирующих концентраторов – промышленных ЭВМ. Концентраторы установлены непосредственно в шкафах комплекса. Предусматривается два взаиморезервирующих концентратора. Концентраторы реализуют следующие программные функции:

- сбор и обработка сигналов от оборудования ДСЗ по двум взаиморезервирующим локальным сетям;
- проверку рассогласования одноименных аналоговых сигналов, проверку диапазонов сигналов с целью обнаружения отказов узлов аналого-цифрового преобразования блоков и / или датчиков;
- диагностику аппаратных и программных средств комплекса;
- передачу в информационную систему

энергоблока информации о состоянии технологического процесса и технических средств.

Взаимодействие штатной и диверсной систем защит.

Схема взаимодействия штатной и диверсной системы защит приведена на рис. 3.

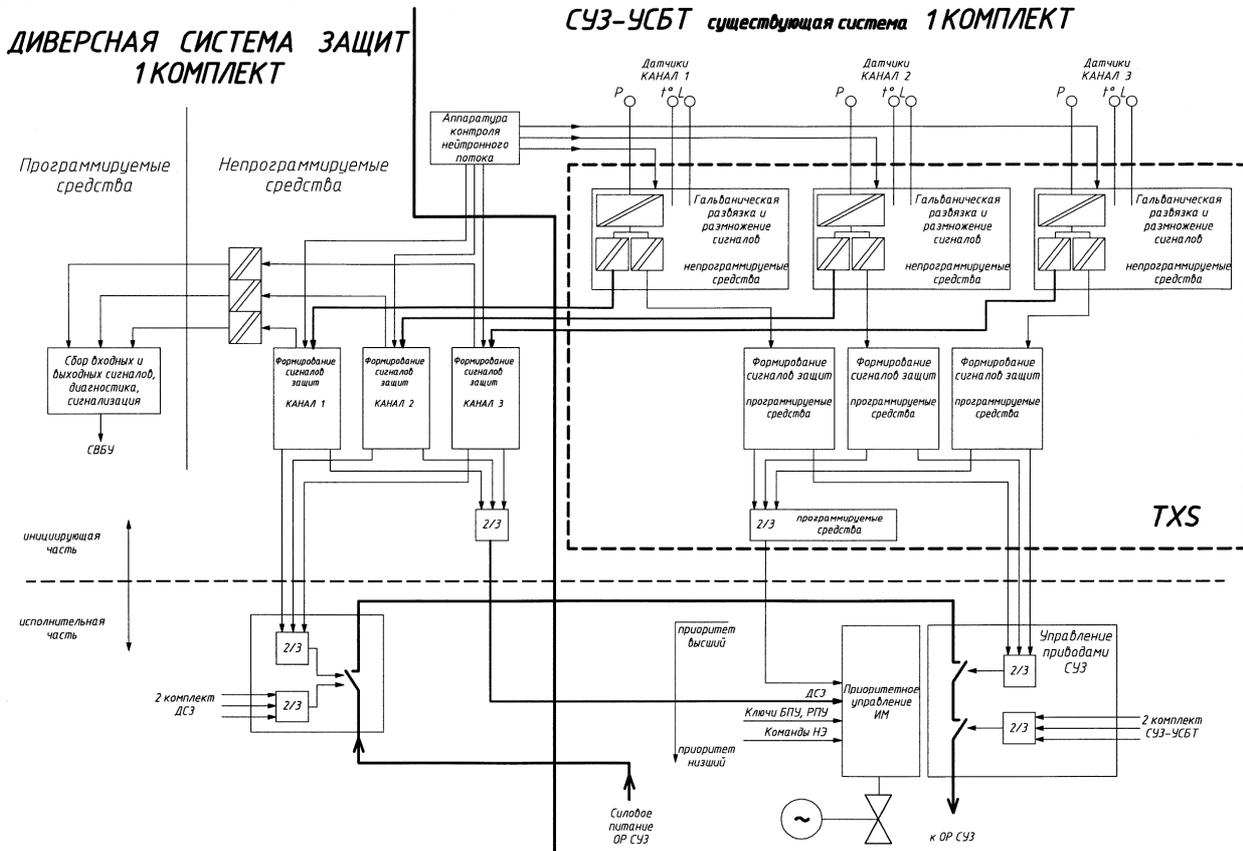


Рис. 3. Схема взаимодействия штатной и диверсной систем защит

В качестве исполнительного механизма для снятия напряжения с ОР СУЗ используются выключатели с двумя независимыми соленоидами. На каждый соленоид действует команда от одного комплекта ДСЗ. Выключатели управляемые ДСЗ включены последовательно с штатными выключателями. Таким образом, действие команд на останов реактора от защит ДСЗ и штатной СУЗ равно приоритетны. Формирование команды на отключающий соленоид по логике «2 из 3» производится проводными связями из 6 команд из блоков силовых ключей (по 2 из каждого канала) на клеммах соленоида.

Управление исполнительными механизмами осуществляется через имеющиеся модули приоритетного управления. Причём более высокий приоритет имеют команды штатной СУЗ-УСБТ. Так как уставки срабатывания защит штатной УСБТ ниже уставок работы защит ДСЗ, при отсутствии

отказа по общей причине управление осуществляется от штатной УСБТ, а при её отказе управление осуществляется от ДСЗ.

Выводы

1. В ВВЭР-2006 не защищена от отказов по общей причине, вызванных возможными ошибками в ПО иницирующая часть подсистем аварийной и предупредительной защит реактора, которая реализована на одних программно-технических средствах TELEPERM XS.

2. Защита от ошибок по общей причине может быть обеспечена только применением разнообразия.

3. Реализация принципа разнообразия в виде создания ДСЗ, реализованной без применения ПО является эффективным средством преодоления ООП.

Литература

1. Алпеев А.С. Надёжность программного обеспечения управляющих систем и безопасность атомных станций [Текст] / А.С. Алпеев // Доклады БГУИР.- 2015г.- № 2 (88) .- С. 101-103.

2. ГОСТ Р-МЭК 62340-2011. Атомные станции. Системы контроля и управления, важные для безопасности. Требования по предотвращению отказов по общей причине [Текст] – Введ. 2012-01-07. – М: Стандартинформ, 2012. - 24 с.

ООО «Московский завод «Физприбор»

АО «Атомэнергопроект», г. Москва

Филиал ОАО «Концерн «Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

**ALGORITHMIZATION OF THE CONTROL DIVERSEY THE SYSTEM
OF COMPREHENSIVE PROTECTION OF NUCLEAR POWER UNITS**

E.V. Andropov, I.R. Cogan, V.P. Povarov, L.P. Pavlov

The description of the implementation of the principle of diversity as a way to exclude (minimize the probability) of common cause failure in safety control system of Novovoronezh NPP-2

Key words: common cause failure, software, safety control systems, diverse protection systems, protection algorithms

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ПОДВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА В СРЕДЕ ANSYS WORKBENCH

А.А. Цыганов, Д.П. Шматов, К.В. Кружаев, А.В. Гаганов

В данной статье рассмотрена методика создания параметризованной модели проточной части подвода центробежного насоса, которая необходима для решения задач оптимизации конструкции проточной части в среде ANSYS Workbench. Методика позволяет создать параметризованную модель проточной части подвода и значительно сократить количество времени на получение оптимального профиля подвода насоса

Ключевые слова: параметризация, модель, центробежный насос, ANSYS

В процессе разработки и создание современных насосных агрегатов для обеспечения высоких энергетических характеристик, одним из важных направлений является совершенствование методик разработки. Основной задачей совершенствования существующих методик является комплексное использование модулей компьютерной динамики жидкости и параметризации моделей подвода в среде ANSYS Workbench.

Классические методики не позволяют достичь требуемых значений параметров насосных систем без использования комплекса современных аппаратно-программных средств автоматизации.

Для расчета подвода центробежного насоса в среде ANSYS необходимо создание модели проточной части. В настоящее время в большинстве организаций профилирование подводов насосных систем осуществляется с использованием инженерных методик [1, 2], среди которых встречаются противоречащие друг другу [3], а также методик собственной разработки, основывающихся на приближенных способах решения и использующих эмпирические зависимости, что существенно снижает точность результатов. На этапе проектирования разработчик используя инженерные методики, получает несколько вариантов геометрий проточной части. На основе полученных вариантов геометрий создаются модели проточной части и проводятся расчёты каждой модели в отдельности. После проведения расчётов в среде ANSYS проводится анализ результатов расчёта каждой модели и выбор оптимального профиля. Для получения наилучшего результата необходимо создание и расчет бесконечного количества моделей подвода с различной геометрией. Подобный подход занимает

значительное количество времени на создание моделей, проведение и анализ результатов расчетов.

Все вышеперечисленное определяет фактические недостатки существующих инженерных методик оптимизации, настоятельно требует разработки и применения новых подходов к проектированию подводов насосных систем с оптимальными характеристиками.

В данной статье рассмотрена методика создания параметризованной модели проточной части подвода центробежного насоса для решения задач оптимизации конструкции проточной части в среде ANSYS Workbench [4].

Особенностью данной методики является создание одной параметризованной модели проточной части, профиль которой изменяется в заданном диапазоне. Параметризация модели заключается в задании двух групп размеров (рис. 1).

1 группа – фиксированные размеры:

- диаметр и координаты расположения входа в подвод, которые задаются техническим заданием для разработки насоса;

- координаты выхода из подвода, которые задаются геометрией рабочего колеса;

- координаты границ отвода и подвода.

2 группа – оптимизационные размеры, которые позволяют управлять профилем проточной части и изменяющиеся в требуемом диапазоне:

- внешний профиль подвода;

- внутренний профиль подвода;

- профиль полуспиральной части подвода;

- координаты языка полуспиральной части подвода.

Вводимые параметры первой группы, в частном случае, характеризуют: диаметр входа в подвод, расстояние от осей X и Y насоса до входной части в подвод, расстояние от оси подвода до его выходной части, расстояние от оси рабочего колеса насоса до участка подвода, граничащего с отводом. Параметры второй группы, также в частном случае, характеризуют: ширину участка подвода граничащего с отводом, ширину внешнего и внутреннего профиля подвода, высоты внешнего и внутреннего конических участков, высоту и угол языка.

Цыганов Александр Александрович – ВГТУ, инженер, тел. 8(473) 2346-483, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

Шматов Дмитрий Павлович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 2346-483, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

Кружаев Константин Владимирович – КБХА, канд. техн. наук, начальник стенда отдела 118, тел. 8(473) 2346-483 e-mail: rd-vgtu@mail.ru

Гаганов Александр Владимирович – ВГТУ, директор НОЦ, тел. 8(473) 2346-483, e-mail: rd-vgtu@mail.ru

Начало работы по параметризации модели подвода начинается с создания проекта Design Modeler в среде ANSYS Workbench [5].

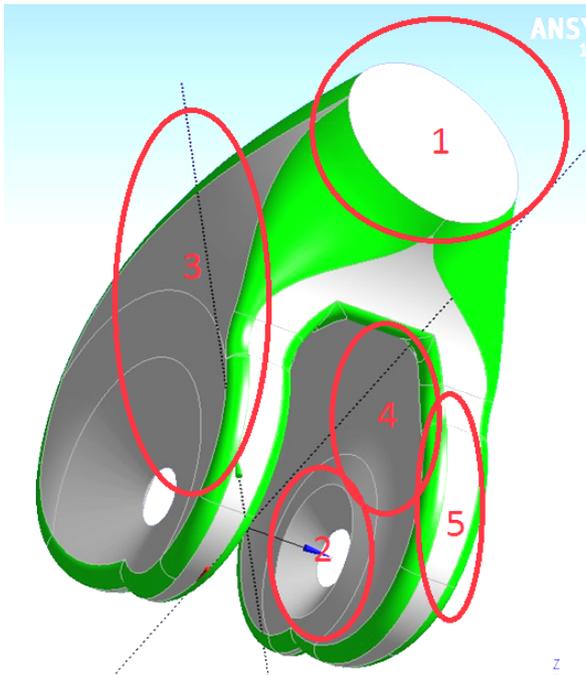


Рис. 1. Модель параметризованного подвода: 1 – вход в подвод, 2 – выход из подвода, 3 – внешний профиль подвода, 4 – внутренний профиль подвода, 5 – полуспиральная часть подвода

В первом этапе необходимо создать несколько эскизов (Sketch), которые располагаются под углом относительно оси вращения (рис.2).

Эскиз состоит:

- профиля входной границы подвода;
- профиля выходной границы подвода;
- профиля границы подвода с отводом;
- профиля внешней границы подвода;
- профиля внутренней границы подвода.

Построение в эскизе профилей входной и выходной границ подвода, профиля границы подвода с отводом производится по фиксированным размерам первой группы. Построение профилей внешней границы подвода и внутренней границы подвода производится по размерам второй группы, с использованием инструментов Line, Spline и Arc [6].

В процессе построения вышеперечисленных профилей в эскизе производится простановка вертикальных, горизонтальных размеров во вкладках Dimensions, с помощью инструментов Horizontal, Vertical, необходимых для задания начальных размеров. Требуется также, в окне Details View (рис. 3) выбирать установленные размеры и в окне Geometry – DesignModeler (рис. 4) ввести имена новых параметров для привязывания выбранных размеров к имени этого параметра [7] (начало параметризации).

После задания имен и привязки параметров выполняется дальнейшая параметризация размеров, которая осуществляется в панели инструментов

нажатием кнопки Parameters. В окне Parameter Editor во вкладке DesignParameter отражаются все введенные параметры.

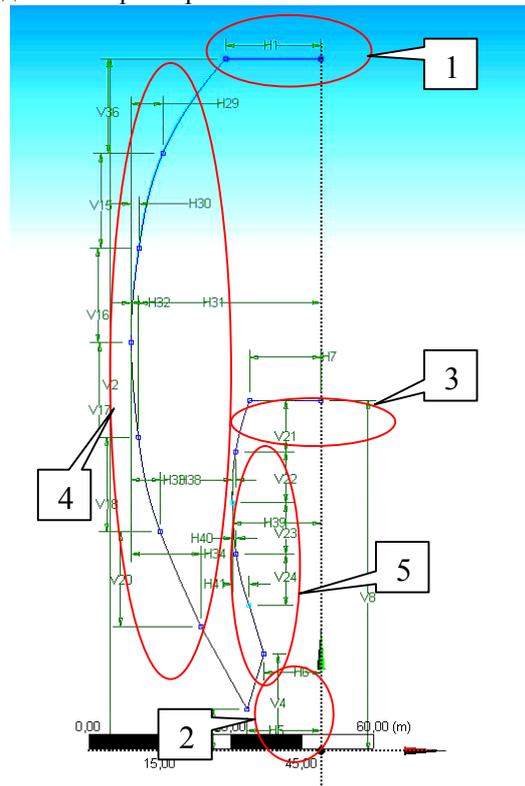


Рис. 2. Эскиз сечения подвода: 1 –входная граница подвода, 2 – выходная граница подвода, 3 – граница подвода с отводом, 4 – внешняя граница подвода, 5 - внутренняя граница подвода

В этой вкладке вводятся имена вспомогательных параметров третьей группы, значения которых являются относительными. В окне Parameter Editor (рис. 5) в свободный столбец Name вписываются названия новых параметров, в столбец Value вписываются значения параметров и столбце Type выбирается значение Dimensionless.

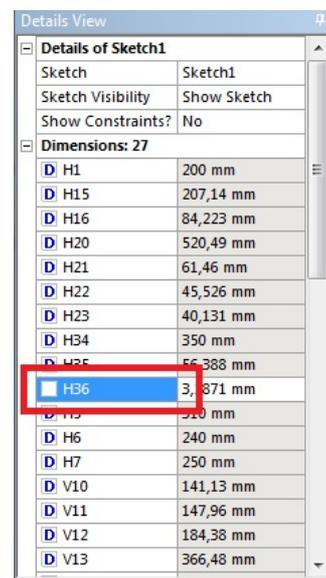


Рис. 3. Окно Details View

Во вкладке Parameter/Dimension Assignments для параметров второй группы задаются относительные значения параметра (или диапазон значений согласно требованиям технического задания для разработки насоса), также могут задаваться выражения описывающие взаимосвязи между размерами и правильную геометрию профиля. В случае если подвод насоса двухстороннего типа, то проводится построение половины профиля.

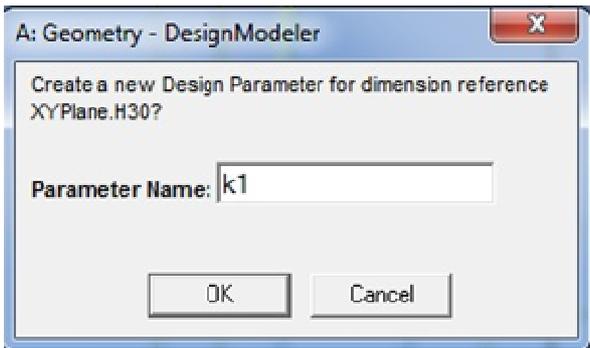


Рис. 4. Окно Geometry – DesignModeler

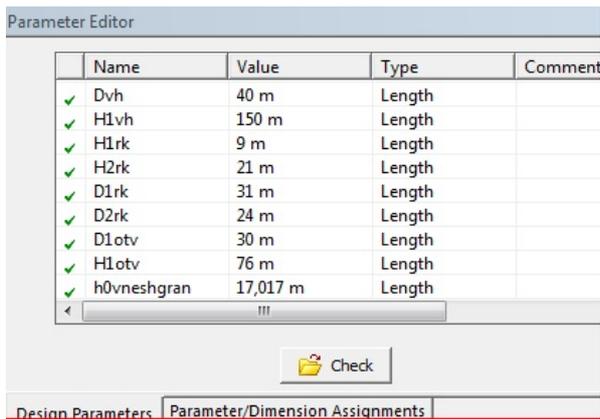


Рис. 5. Окно Parameter Editor

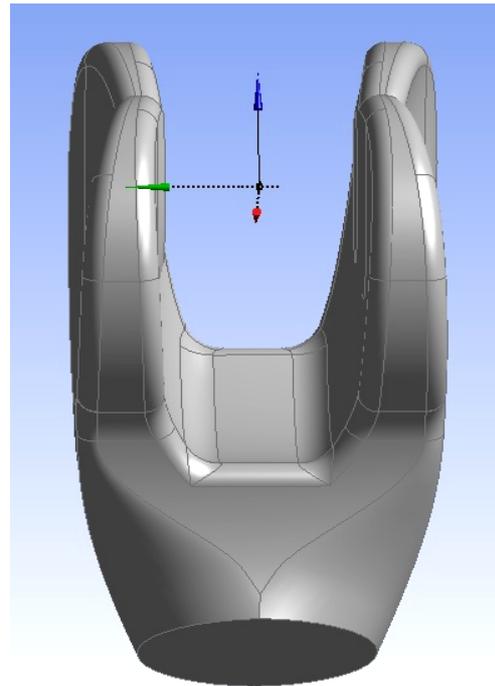


Рис. 6. Подвод

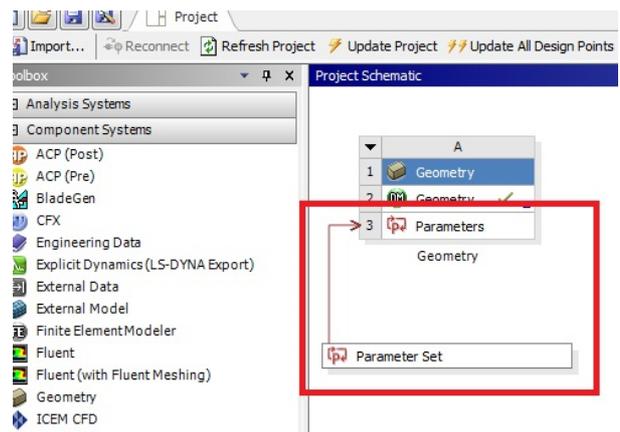


Рис. 7. Рабочее поле проекта окна ANSYS Workbench

В дальнейшем необходимо создать твердое тело (рис. 6) по полученным эскизам.

В заключительном этапе производится создание скруглений граней подвода и заданий радиусов скруглений. Затем выполняем привязку размера к имени этого параметра.

После завершения построения параметризованной модели в рабочем поле проекта окна ANSYS Workbench ниже элемента Geometry появляется строка Parameters (рис. 7), которая позволяет вносить изменения размеров. Активация строки Parameters активизирует таблицу параметров (рис. 8). В процессе последующих расчетов оптимизационные параметры из второй группы позволяют изменять профиль проточной части в заданном диапазоне и имеют обратную связь с программными реализациями моделей компьютерной динамики жидкости и гидродинамическими процессами.

ID	Parameter Name	Value	Unit
P1	Dvh	200	mm
P2	H0vh	1500	mm
P3	D1rk	310	mm
P4	D2rk	240	mm
P5	H1rk	90	mm
P6	H2rk	210	mm
P7	D1otv	150	mm
P8	H1otv	760	mm
P10	Dpodv	460	mm
P11	h0vneshgran	600	mm
P12	h0vnutgran	310	mm
P13	f0	260	mm
P14	D2vh	620	mm
P15	H2vh	1150	mm
P16	H1vh	300	mm
P17	h1	730	mm
P18	h2	400	mm
P19	h3	400	mm
P20	yz1	200	mm
P21	yz2	200	mm
P22	h4	700	mm

Рис. 8. Таблица параметров

Гидродинамическая эффективность конструкции параметризованной модели подвода была подтверждена при проведении вычислительного эксперимента в программном комплексе ANSYS для магистрального нефтяного насоса МНН1250 (рис. 9, 10).

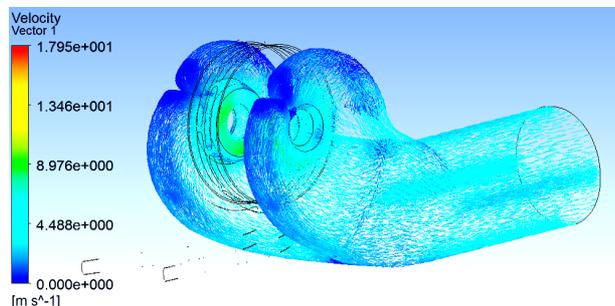


Рис. 9. Поле скоростей

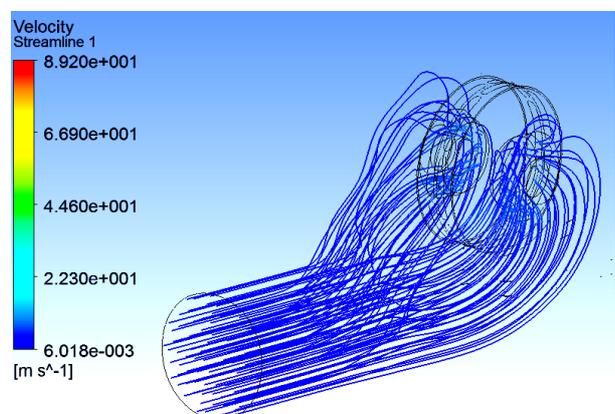


Рис. 10. Линии тока

Исходя из выше изложенного, сделаем вывод, что разработанная методика позволяет создать параметризованную модель проточной части подвода центробежного насоса в среде ANSYS Workbench, исключить создание бесконечного количества моделей подвода с различной геометрией, значительно сократить количество времени на создание моделей, проведение и анализ результатов расчетов. Данные результаты достигаются применением эскизов сечений с оптимизационными параметрами, которые позволяют изменять профиль проточной части в

заданном диапазоне и имеют обратную связь с программными реализациями моделей компьютерной динамики жидкости и гидродинамическими процессами. Также обеспечивает получение оптимального профиля подвода насоса с заданными значениями критериев эффективности функционирования. Разработанная методика является уникальной и не имеет аналогов, в результате чего детальное сравнение с другими методиками невозможно.

Отличительной особенностью и преимуществом разработки является реализация тесной интеграции со средствами компьютерного моделирования и оптимизации среды проектирования ANSYS.

Данная методика оптимизации модели подвода, также, позволяет использовать как встроенные средства профилирования ANSYS Workbench, так и задавать в качестве исходных данных профилирования значения параметров, полученные с помощью инженерных методик либо программно-алгоритмических средств собственной разработки.

Литература

1. Айзинштейн, М.Д. Центробежные насосы для нефтяной промышленности [Текст] / М.Д. Айзинштейн. – М.: Машиностроение, 1957. – 363 с.
2. Ломакин, А.А. Центробежные и осевые насосы [Текст] / А.А. Ломакин. – М.: Машиностроение, 1966. – 364 с.
3. Михайлов, А.К. Лопастные насосы. Теория, расчёт и конструирование [Текст] / А.К. Михайлов, В.В. Малюшенко. – М.: Машиностроение, 1977. – 288 с.
4. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров. Справочное пособие [Текст] / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение, 2004 – 87 с.
5. www.ansysolutions.ru [электронный ресурс].
6. Ansys CFX Users Manual [электронный ресурс].
7. Валюхов, С.Г. Оптимизационное проектирование проточной части магистрального нефтяного насоса с использованием Turbo инструментов ANSYS [Текст] / С.Г. Валюхов, А.В. Кретинин, Д.Н. Галдин, С.С. Баранов // Насосы. Турбины. Системы. - 2015. № 1. -С. 56-70.

Воронежский государственный технический университет
Акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж

DEVELOPMENT OF A PARAMETERIZED MODEL OF THE FLOW PART SUPPLY OF A CENTRIFUGAL PUMP IN ANSYS WORKBENCH

A.A. Tsyganov, D.P. Shmatov, K.V. Kruzhaev, A.V. Gaganov

This article describes the methodology of creating a parameterized model of the flow part supply of a centrifugal pump, which is necessary for the decision of tasks of optimization of hydraulic design in the ANSYS Workbench. The method allows to create parameterized model of a flowing part of the supply and significantly reduce the amount of time to deliver the optimal profile of a supply pump

Key words: parameterization, model, centrifugal pump, ANSYS

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОМЕХАНИКИ

А.В. Кретинин, Е.Е. Куликова, К.Д. Булыгин

Для решения задачи оптимизации конструкции теплообменного аппарата средствами пакета конечно-элементного анализа ANSYS создана параметризованная геометрическая модель проточной части теплообменника. Решение уравнений гидродинамики осуществляется в модуле ANSYS CFX. Нелинейная оптимизация проводится в модуле DesignXplorer

Ключевые слова: ANSYS, оптимизация, компьютерная динамика жидкости

Для решения задачи оптимизации конструкции теплообменного аппарата средствами пакета конечно-элементного анализа ANSYS необходимо создать геометрическую параметрическую модель проточной полости теплообменника со встроенным автоматическим построителем расчетной сетки, создать расчетную модель вычислительной гидродинамики, сформировать параметрически замкнутый вычислительный блок и интегрировать с ним модуль нелинейной оптимизации.

Геометрическая модель коллекторного устройства имеет вид, который представлен на рис. 1.

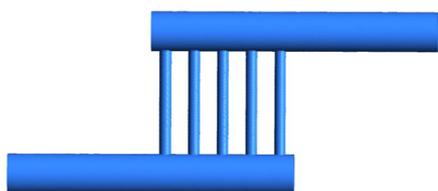


Рис. 1. Геометрическая модель теплообменника

Для повышения тепловой эффективности теплообменного аппарата необходимо обеспечение равномерного распределения теплоносителя по трубкам теплообменника. Для параметрических исследований и оптимизации формируется расчетный блок на платформе Ansys Workbench (рис. 2). Основным этапом создания вычислительного блока остается интеграция твердотельной модели проточной полости и автоматического сеткопостроителя. С этой целью необходимо использовать функционал модуля ANSYS Meshing.

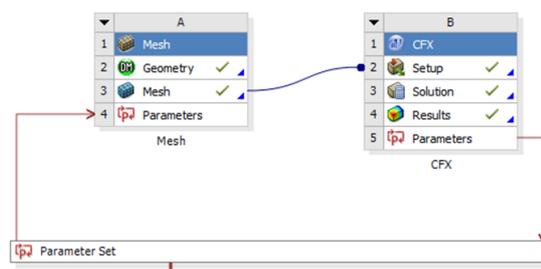


Рис. 2. Параметрически замкнутый расчетный блок

Ключевым этапом является задание параметров автоматической генерации сетки. В ряде статей [1-5] отмечается, что для одних и тех же граничных условий при различных параметрах генерации сетки могут получиться различные расчетные варианты. Исследование влияния сетки на расчет приводится ниже.

Формирование вычислительной модели для математического моделирования осуществляется в соответствии с функционалом модуля ANSYS CFX. Базовые моменты создаваемой расчетной модели представлены далее.

1. Система уравнений

Данная система включает основные уравнения гидродинамики: уравнение неразрывности; уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу [6]; уравнения двухпараметрической $k-\epsilon$ модели турбулентности [7].

2. Постановка граничных условий

Рабочей средой принят воздух при температуре 25°C. На входных границах назначается массовый расход. На выходных границах тип граничных условий - Outlet со значением Relative Pressure равным 101300 Па.

Кретинин Александр Валентинович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 252-34-52, e-mail avk-vrn@mail.ru

Куликова Екатерина Евгеньевна – ВГТУ, аспирант, тел. 8(473) 252-34-52, e-mail: kylikovna@mail.ru

Булыгин Кирилл Дмитриевич – ВГТУ, аспирант, тел. 8(473) 252-34-52, e-mail: hulk_vrn@bk.ru

3. Результаты решения

Контролируемыми результатами моделирования являются значения расходов через трубки теплообменника. Помимо этого, по данным результатам в модуле CFX - CFD Post формируются синтетические критерии, автоматически рассчитываемые в редакторе выражений Expressions: параметр неравномерности распределения компонента по каналам

$$Kr1 = \sum_5 (\dot{m}_i - \dot{m}_{cp})^2$$

Для оптимизационных исследований использовался модуль Response Surface Optimization, проводящий оптимизационные исследования по поверхности отклика.

В рамках верификации модели проведена серия расчетов по определению параметров математического моделирования. На рис. 3 представлены результаты расчета расходов в трубках теплообменника, полученные на последовательно измельченных сетках.

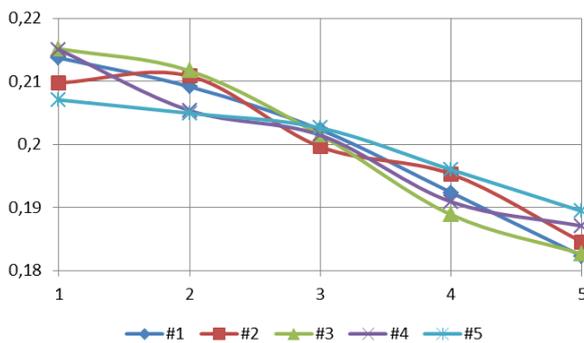


Рис. 3. Зависимости расходов в трубках от размера сетки

По результатам расчетов можно сделать вывод, что не удалось найти параметры автоматического построения сетки, при которых дальнейшее ее измельчение не влияет на результаты расчета. Более того, не удалось достичь сходимости решения по всем уравнениям к значению $RMS=0.0001$. При попытке достичь этого значения, решая задачу во Fluent, также был получен отрицательный результат. Поэтому в дальнейших оптимизационных расчетах было принято значение $RMS=0.0005$.

Метод построения поверхности отклика основан на методе нейросетевой аппроксимации, план эксперимента - Optimal Space Filling. В качестве метода оптимизации по поверхности отклика использован метод исследования пространства параметров. На рисунке 4 показан оптимизированный вариант конструкции теплообменника.

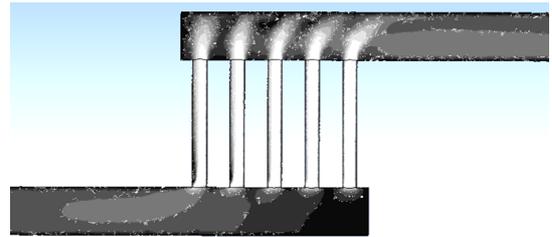


Рис. 4. Результаты оптимизации

Использование методики для оптимизации кожухотрубного теплообменного аппарата

В исследуемой модели организован осевой подвод теплоносителя в центральной части распределительной камеры в целях наиболее благоприятного (равномерного) распределения компонента по элементам трубной решетки. Трубная решетка состоит из труб постоянного диаметра, которые размещены по концентрическим окружностям (учитывая одну трубку в центре решетки) общим количеством $1+6+12+18+24+30+36+42$: итого 169 трубок.

В отдельной трубке конструктивно выполнена втулка меньшего диаметра. Для трубок, располагающихся в одном ряду, втулки имеют одинаковый диаметр, но в разных рядах втулочные диаметры могут меняться.

Параметры моделирования, факторы и критерии формируемой оптимизационной расчетной модели аналогичны описанным выше. На рис. 5 изображена структура вычислительного блока, скомпилированного на платформе ANSYS Workbench для реализации оптимизационных исследований.

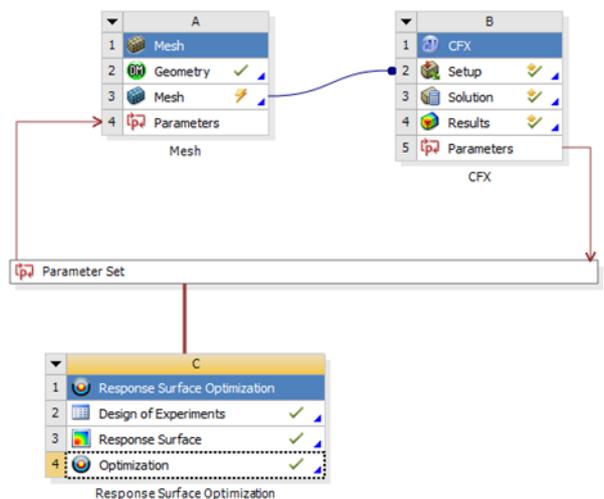


Рис. 5. Расчетный блок с подключенным модулем оптимизации

Необходимо отметить, что перед проведением оптимизации для минимизации вычислительной ошибки моделирования проводилась идентификация расчетного алгоритма до обеспечения приемлемой точности численных результатов (рис. 6).

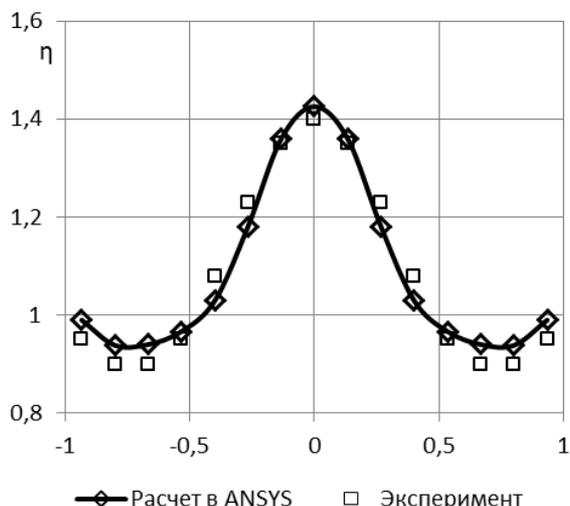


Рис. 6. Сравнительный анализ расчетных результатов и данных экспериментальных исследований

Анализ физических эффектов

По результатам численных исследований проведен анализ расчетных распределений параметров для лучшего понимания некоторых закономерностей распределения расходов по отдельным элементам трубной решетки: например, известна закономерность, что в трубках, расположенных в центральной части, и на периферии трубной решетки фиксируются повышенные расходы, а в трубках, расположенных в средней части решетки расходы существенно меньше средних значений. На рис. 7 представлено распределение скорости в распределительной камере, свидетельствующее о возникновении обширной вихревой области. Ее местоположение, вероятно, и приводит к снижению величин расходов через трубки 4,5 и 6 рядов теплообменника.

Однокритериальная условная нелинейная оптимизация

Вербальная формулировка оптимизационной задачи формулируется таким образом - следует подобрать втулочные диаметры в отдельных трубках так, чтобы распределение расхода по трубкам отдельных рядов было наиболее равномерным: при этом ограничение в постановке задачи состоит в том, чтобы потери полного давления должны быть одинако-

вы для неоптимизированного и оптимизированного вариантов моделей.

Метод построения поверхности отклика базируется на нейросетевой аппроксимации, план эксперимента (Optimal Space Filling) содержит 81 точку. В качестве метода оптимизации по поверхности отклика использован метод исследования пространства параметров. На рисунке 8 приведена динамика зависимости коэффициента гидравлической неравномерности по различным рядам решетки от числа итераций оптимизационного поиска.

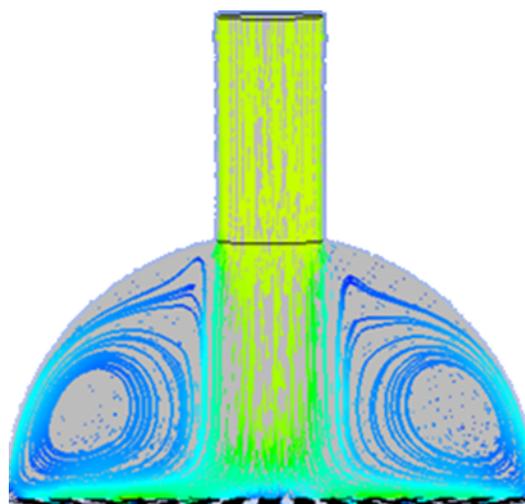


Рис. 7. Вихревые области во входной камере теплообменника

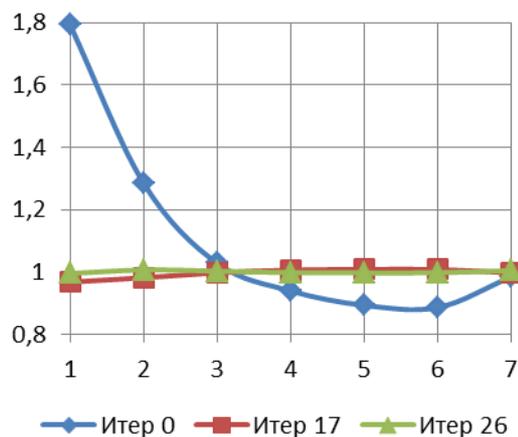


Рис. 8. Динамика коэффициента гидравлической неравномерности по рядам в зависимости от номера итерации оптимизационного поиска

Заключение

Реализация разработанной методики осуществляется методами параметрической оптимизации и содержит ряд связанных проблем.

1. Разработка параметризованных 3D-моделей элементов проточной части исследуемых теплообменных устройств. Формирова-

ние вычислительных модулей в среде ANSYS. Отладка файла сценария последовательности расчета, который реализует всю последовательность проектирования, расчета и оптимизации с записью результатов во внешний файл данных. Создание программы-переходника, реализующей следующий функционал: задание и запись в служебный файл ANSYS геометрических параметров модели, запуск ANSYS на проектирование и численные исследования, считывание из служебного файла расчетных результатов, запись результатов во внешний файл данных. Таким образом, расчетчик в текстовом файле назначает необходимые параметры, осуществляет запуск программы-переходника с целью автоматического (без вмешательства оператора) проведения расчета и проектирования на платформе ANSYS.

2. Создание набора программ-переходников, реализующих возможные сценарии оптимизации с различными постановками задачи и исполнением проточной части.

3. Создание оптимизационных моделей на основе набора программ-переходников, осуществляющих автоматический обмен данными между расчетными модулями ANSYS и программой нелинейной оптимизации: оптимизационная программа генерирует вектор значений факторов и сохраняет их во внешний файл данных. Далее запускается программа-переходник, осуществляющая считывание значений факторов, передачу этих значений в служебный файл ANSYS и запуска сценария проектирования и расчета. Далее при реализации этого сценария происходит считывание результатов из служебного файла ANSYS и производится запись результатов во внешний файл данных, к которому в свою очередь обращается программа оптимизации.

4. Формирование набора формализованных постановок задач оптимизации: набора варьируемых параметров, набора критериев, диапазонов изменения факторов, ограничений.

5. Проведение многокритериальной оптимизации для отдельных элементов проточной части всей модели исследуемого теплообменника. Формирование Парето-оптимальных множеств решения. Проектирование проточной части теплообменника с учетом результатов решения задач оптимизации

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта "Создание высокотехнологичного производства магистральных нефтяных насосов нового поколения с использованием методов многокритериальной оптимизации и уникальной экспериментальной базы" (Договор № 02G25.31.0100)

Литература

1. Einfeld, B. (2010) The German National Joint Project MUNA: Management and Minimization of Uncertainties and Errors in Numerical Aerodynamics. In: Proceedings. 5th European Conference on Computational Fluid Dynamics, ECCOMAS CFD, 14-17 Jun 2010, Lisbon. ISBN 978-989-96778-1-4.
2. Ghanem, R.G., Spanos, P.D. (1991), Stochastic Finite Element: A Spectral Approach, Chapter 1, Dover Publications.
3. Herbin, E., Jakubowski, Ravachol, M., Dinh, Q (2007), Management of uncertainties at the level of global design, Paper 63, NATO RTO-AVT-147 Symposium on "Computational Uncertainty in Military Vehicle Design", 3-6th December 2007, Athens, Greece
4. Lin, G., Su, C.-H., Karniadakis, G.E. (2006), Modeling Random Roughness in Supersonic Flow Past a Wedge, paper AIAA 2006-124, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 January 2006, Reno, Nevada.
5. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах.- М.: Мир, 1991. 656 с.
6. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов.- Мн.: Дизайн-ПРО, 1997. 512 с.
7. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1987. 354 с.
8. Гаганов, А.В. Оптимизационное проектирование проточной части трубчатого теплообменного аппарата с использованием инструментария ANSYS WORKBENCH [Текст] / А.В. Гаганов, А.В. Кретинин, Е.Е. Куликова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, №6. - С.24-28. 2015

Воронежский государственный технический университет

IMPLEMENTING DECISION PROCEDURE OF OPTIMIZATION PROBLEM FOR HEAT PIPES USING ANSYS WORKBENCH

A.V. Kretinin, E.E. Kulikova, K.D. Bulygin

To solve the problem of the heat exchanger design optimization by the finite element analysis using ANSYS software it is necessary to create a parameterized geometric model of the heat exchanger liquid end. This paper shows a technique that can be considered as standard model for solving optimization problems with the use of computer fluid dynamics models

Key words: ANSYS, optimization, computer fluid dynamics

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ЖЕСТКО ПРИСОЕДИНЕННОЙ ИНЕРЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ

Хлайнг Мьюо Вин, В.Н. Шамберов

На рассмотрение выносятся результаты исследования динамической модели электродвигателя с жестко присоединенной инерционной нагрузкой и сухим трением. Сухое трение в нагрузке моделируется по некулоновской идеализации, при которой учитывается не только наличие отрицательного участка в характеристике трения, но и превышение сил трения покоя над силами трения движения. Исследование проводится методом точечных отображений в фазовом пространстве модели. Результаты исследования представляются в виде разбиения пространства параметров электродвигателя с нагрузкой на области качественно различного его динамического поведения

Ключевые слова: электродвигатель, некулоновская модель сухого трения, трение покоя, трение движения, математическая модель, разбиение пространства параметров

1. Введение. Рассматривается математическая модель электродвигателя заданная следующим описанием:

1) уравнение электрического равновесия

$$L \cdot \dot{I}_я = -R \cdot I_я - i_p \cdot c_e \cdot \Omega + U; \quad (1a)$$

2) уравнения механического равновесия

$$\begin{aligned} J \cdot \dot{\Omega} &= 0, \text{ если } \Omega = 0 \\ &\text{и } |M - J \cdot \dot{\Omega}_-| < M_{тр.0}; \\ J \cdot \dot{\Omega} &= M - M_{тр.дв.}(\Omega), \text{ если } \Omega \neq 0, \\ &\text{или если } \Omega = 0 \text{ и } |M - J \cdot \dot{\Omega}_-| \geq M, \end{aligned} \quad (16)$$

где $M_{тр.дв.}(\Omega) = k_{тр} \cdot \Omega + M_{с.тр.дв.}(\Omega)$,

$$M_{с.тр.дв.}(\Omega) = M(\Omega) \cdot \text{Sign}(\Omega),$$

$$M = i_p \cdot c_M \cdot I_я, \quad J = i_p^2 \cdot J_э + J_H,$$

$$k_T - k' < \left(\frac{dM_{тр.дв.}}{d\Omega} \right) < k_T.$$

Модель относится к моделям логико-динамического класса [1 - 5] с некулоновской моделью сухого трения [2, 3]. В модели обозначено: 1) переменные состояния: $I_я$, Ω - ток якоря и угловая скорость поворота нагрузки соответственно; 2) переменная M - момент, приложенный непосредственно к нагрузке; 3) параметр J - характеризует инерционность ротора электродвигателя ($J_э$) с жестко присоединенной нагрузкой (J_H); $k_{тр} > 0$ - параметр, характеризующий величину вязкого тре-

ния; $k' > 0$ - параметр, характеризующий максимальную «отрицательность» характеристики сухого трения; i_p - передаточное число редуктора; $J \cdot \dot{\Omega}_-$ - предыстория (предыдущее значение момента инерции на момент определения последующего); 4) $M_{тр.дв.}(\Omega) = M_{в.тр.}(\Omega) + M_{с.тр.дв.}(\Omega)$ - момент сил трения (вязкого и сухого) при движении; $M_{в.тр.}(\Omega) = k_{тр} \cdot \Omega$ - момент сил вязкого трения; $M_{с.тр.дв.}(\Omega) = M(\Omega) \cdot \text{Sign}(\Omega)$ - момент сил сухого трения при движении, где $M(\Omega)$ - положительно вогнутая убывающая функция (рис. 1); 5) параметры трения: $M_{тр.0}$ - момент сил трения покоя; $M_{тр.ост.}$ - момент сил сухого трения при остановке ($M_{тр.ост.} \leq M_{тр.0}$); $M_{тр.min.}$ - минимальный момент сил сухого трения при движении, при этом $M_{тр.min.} \leq M_{тр.ост.}$ (рис. 1).

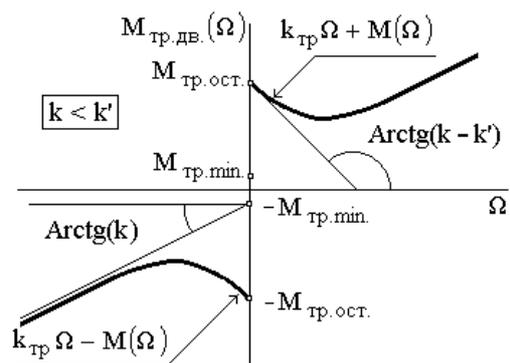


Рис. 1а. Характеристика внешнего трения при движении (превалирование сухого трения над вязким трением)

Хлайнг Мьюо Вин - СПбГМТУ, аспирант, e-mail: lunnat86@gmail.com
Шамберов Владимир Николаевич – СПбГМТУ, канд. техн. наук, профессор, e-mail: shamberov@mail.ru

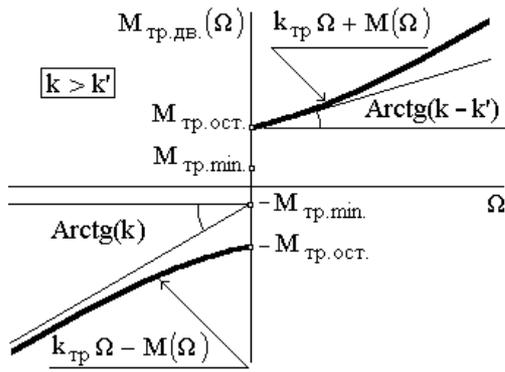


Рис. 16. Характеристика внешнего трения при движении (превалирование вязкого трения над сухим трением)

2. Экспериментально-теоретическая часть.

Линеаризовав уравнения динамики (1-а, б) в окрестности состояния равновесия: $\Omega = \Omega_{ст}$, $M(U, \Omega_{ст}) = M_{тр.дв.}(\Omega_{ст})$ в соответствии с характеристическим полиномом линеаризованных уравнений

$$J \cdot p^2 + \left[\frac{J \cdot R}{L} + \left(\frac{dM_{тр.дв.}}{d\Omega} \right)_{\Omega_{ст.}} \right] \cdot p^1 + \frac{R}{L} \left[\frac{i_p^2 \cdot c_e \cdot c_m}{R} + \left(\frac{dM_{тр.дв.}}{d\Omega} \right)_{\Omega_{ст.}} \right] \cdot p^0 \quad (2)$$

представим структуру разбиения пространства параметров электродвигателя с нагрузкой по типу состояний равновесия (рис. 2).

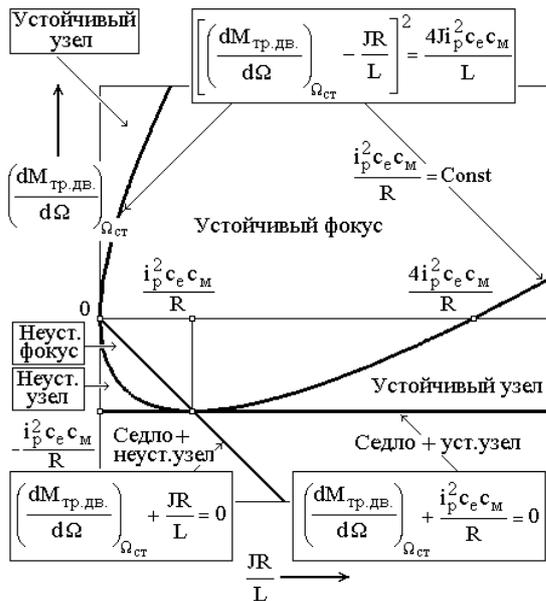


Рис. 2. Структура разбиения пространства параметров по типу состояния равновесия

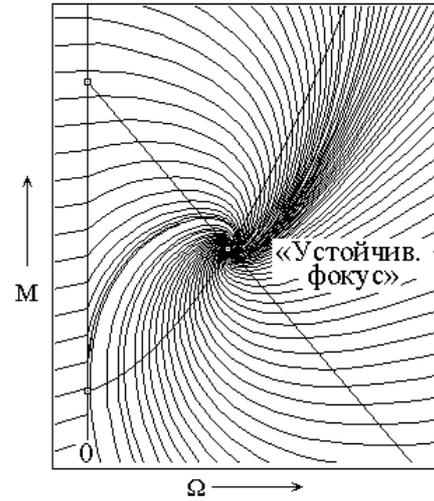


Рис. 3а. Фрагмент фазового портрета с состоянием равновесия «Устойчивый фокус»

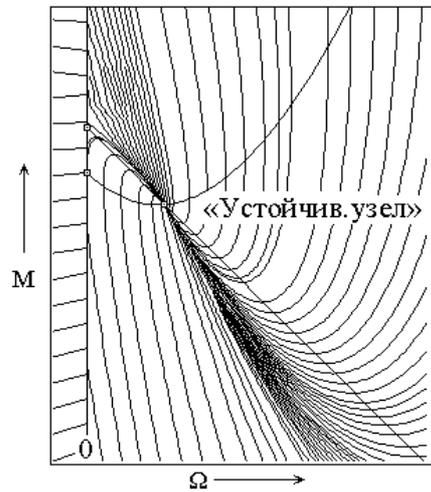


Рис. 3б. Фрагмент фазового портрета с состоянием равновесия «Устойчивый узел»

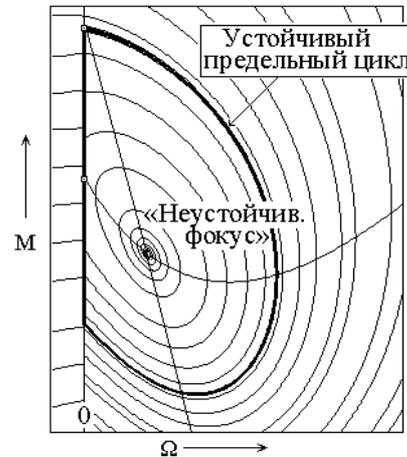


Рис. 3в. Фрагмент фазового портрета с состоянием равновесия «Неустойчивый фокус»

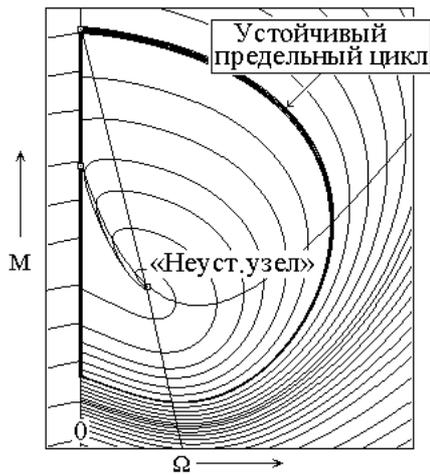


Рис. 3г. Фрагмент фазового портрета с состоянием равновесия «Неустойчивый узел»

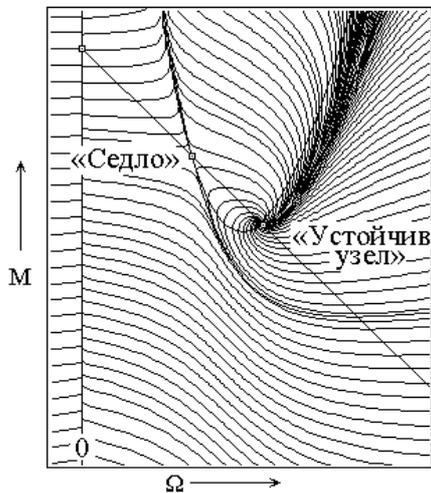


Рис. 3д. Фрагмент фазового портрета с двумя состояниями равновесия «Седло» - «Устойчивый узел»

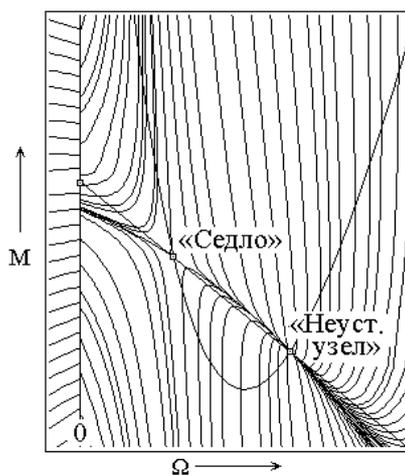


Рис. 3е. Фрагмент фазового портрета с двумя состояниями равновесия «Седло» - «Неустойчивый узел»

Примечание. Состояние равновесия определяется пересечением графиков

$$M(U, \Omega) = \frac{i_p \cdot c_M}{R} U - \frac{i_p^2 \cdot c_e \cdot c_M}{R} \Omega \text{ и}$$

$$M_{\text{тр.дв.}}(\Omega) = k_{\text{тр}} \cdot \Omega + M_{\text{с.тр.дв.}}(\Omega)$$

в точке $\Omega = \Omega_{\text{ст}}$, $M(U, \Omega_{\text{ст}}) = M_{\text{тр.дв.}}(\Omega_{\text{ст}})$.

Появление на фазовой плоскости устойчивого предельного цикла относительно состояния равновесия типа «Устойчивый фокус» связано с – раздвоением (бифуркацией) полуустойчивого цикла на два цикла: внутреннего – неустойчивого и наружного – устойчивого (рис. 4а,б).

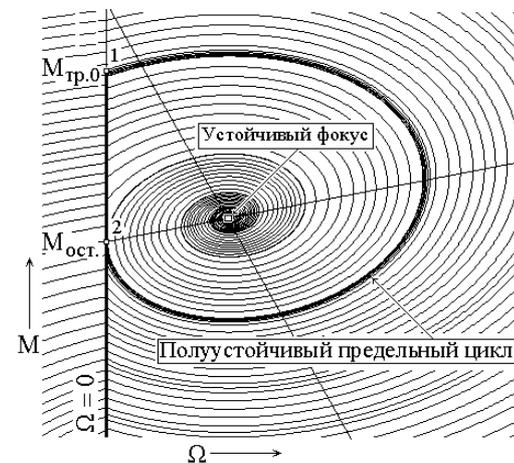


Рис. 4а. Полуустойчивый предельный цикл на фазовом портрете

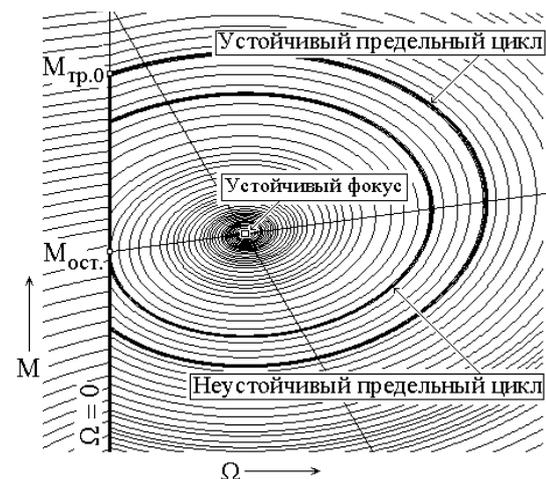


Рис. 4б. Раздвоение (бифуркация) полуустойчивого предельного цикла на фазовом портрете при состоянии равновесия «Устойчивый фокус»

3. Теоретический анализ. Таким образом, возникновению фрикционных автоколебаний соответствует существование на фазовой плоскости полуустойчивого предельного цикла. Полуустойчивый предельный цикл существует, если существует фазовая траектория, выходящая из точки 1 с

координатами $M(t_1) = M_{тр.0}$, $\Omega(t_1) = 0$ и входящая в точку 2 с координатами $M(t_2) = M_{ост}$, $\Omega(t_2) = 0$ (см. рис. 4-а)

Для определения достаточных условий отсутствия автоколебаний при состоянии равновесия «Устойчивый фокус» примем $\left(\frac{dM}{d\Omega}\right)_{\Omega_{ст}} = k - k'$,

введем обобщенные параметры $A = k - k'$ (Н·м·с/рад), $B = J \cdot R / L > 0$ (Н·м·с/рад),

$C = i_p^2 \cdot c_e \cdot c_m / R > 0$ (Н·м·с/рад), произведем масштабирование времени $t \equiv J \cdot \tau$ (где τ - «новое» время) и в результате получим характеристический полином (2) в следующем виде

$$p^2 + (A + B) \cdot p^1 + B \cdot (A + C) \cdot p^0. \quad (3)$$

Уравнения движения, например при $\Omega > 0$, в достаточно малой окрестности состояния равновесия на основе полученного полинома (3) можно представить в виде

$$\Delta \ddot{M} + (A + B) \cdot \Delta \dot{M} + B \cdot (A + C) \cdot \Delta M = 0. \quad (4)$$

Уравнение искомой фазовой траектории, полученной по (4) при $A + B > 0$, $A + C > 0$ и $(A - B)^2 < 4 \cdot B \cdot C$ будет следующим

$$\frac{[\Delta \dot{M}(t_2) - \alpha \cdot \Delta M(t_2)]^2 + \beta^2 \cdot [\Delta M(t_2)]^2}{[\Delta \dot{M}(t_1) - \alpha \cdot \Delta M(t_1)]^2 + \beta^2 \cdot [\Delta M(t_1)]^2} = \frac{\exp\left[\frac{2 \cdot \alpha}{\beta} \operatorname{arctg} \frac{\beta \cdot \Delta M(t_2)}{\Delta \dot{M}(t_2) - \alpha \cdot \Delta M(t_2)}\right]}{\exp\left[\frac{2 \cdot \alpha}{\beta} \operatorname{arctg} \frac{\beta \cdot \Delta M(t_1)}{\Delta \dot{M}(t_1) - \alpha \cdot \Delta M(t_1)}\right]} \quad (5)$$

где $\alpha = -\frac{A+B}{2}$, $\beta = \frac{\sqrt{4 \cdot B \cdot C - (A-B)^2}}{2}$.

Подставив в (5) координаты точек 1 и 2 (рис.5), получим уравнение граничной поверхности, отделяющей в пространстве параметров область, где возможны фрикционные автоколебания при состоянии равновесия типа «Устойчивый фокус» от области, где подобные автоколебания не возможны (рис. 6).

4. Заключение. Одной из проблем эксплуатации следящих электроприводов, к которым предъявляются повышенные требования по точности позиционирования, является возникновение фрик-

ционных автоколебаний на малых «ползучих» скоростях перемещения нагрузки [1]. Причиной возникновения фрикционных автоколебаний считалось наличие отрицательного участка в характеристике трения (рис.1). Результаты аналитического исследования, представленные в данной работе показывают, что автоколебания могут возникать и при отсутствии отрицательного участка. Причиной их появления является превышения сил трения покоя над силами трения движения.

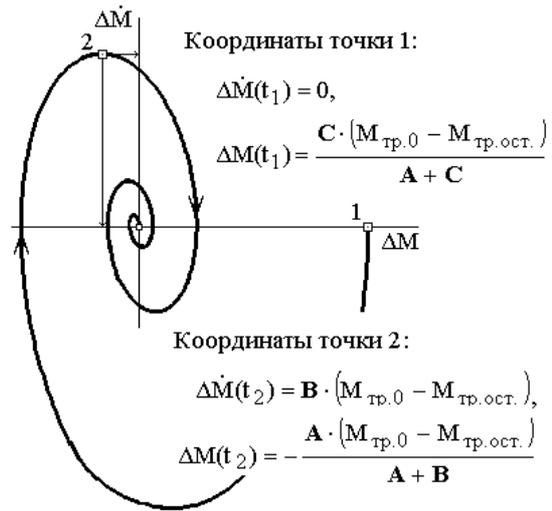


Рис. 5. Искомая фазовая траектория

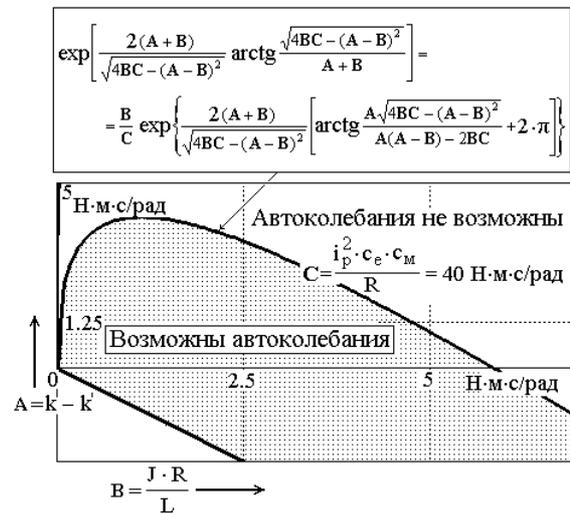


Рис. 6. Фрагмент разбиения пространства параметров для

$$A + B > 0, A + C > 0, (A - B)^2 < 4BC, C = 40 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$$

Литература

1. Шамберов В.Н. Фрикционные автоколебания в механических системах (еще раз о маятнике Фруда) // Фундаментальные проблемы теоретической и прикладной механики: Вестник Нижегородского государственного университета им. Лобачевского, 2011, №4(5), с. 2610 - 2611.
2. Шамберов В.Н. Влияние сухого трения на устойчивость работы машин // Проблемы машиноведения: точность, трение и износ, надежность, перспективные технологии. СПб: Наука, Институт проблем машиноведения РАН, 2005, с. 256 – 273.
3. Шамберов В.Н. Влияние сухого трения на возникновение автоколебаний в машинах (аналитическое исследование) // Акустические проблемы большого города. Конверсионные вопросы: Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Выпуск 15(299) – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2003. - С. 125 – 132.
4. Хлайнг Мьйо Вин. Моделирование и исследование динамики электропривода с инерционной нагрузкой и сухим трением // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы 4-ой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 12 – 13 февраля 2015 г. – СПб. 2015. С. 190 – 191.
5. Хлайнг М.В., Шамберов В.Н. Моделирование и исследование динамики электропривода с сухим трением внагрузке // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий: сб. трудов VIII Международной научной конференции, Воронеж, 21 – 26 сентября, 2015 г. – Воронеж. 2015. С. 374 – 377.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Кораблестроительный институт)

THE ELECTRO-MOTOR MATHEMATIC MODEL WITH HARD-CONNECTED INERTIAL LOAD

Hlayng Myo Win, V.N. Shamberov

The results of investigation of electro-motor (with hard-connected inertial load and dry friction) dynamical model are brought in to consideration. Dry friction in the load is modeled according to non-Coulomb idealization. It considers not only the presence of negative friction, but also the excess of state friction over the movement friction. The research is carried out by the point transform method in the model's phase space. The results of the investigation are represented as "partition" of parameters' space into the areas of its qualitatively different dynamic behavior

Key words: electro-motor, non-Coulomb dry friction model, state friction, movement friction, mathematic model of the electro driver, partition" of parameters' space of the electro driver

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К КОЭФФИЦИЕНТУ ОСЛАБЛЕНИЯ
АЭРОЗОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕРЫВАНИЯ РАДИОЛИНИИ УПРАВЛЕНИЯ**

М.Г. Калашников, В.Г. Керков, С.В. Утемов

Разработан методический аппарат для обоснования требований к характеристикам аэрозольных помех, приводящих к прерыванию радиосигналов управления ракетой в миллиметровом диапазоне длин волн. Проведена оценка отношения сигнал/помеха в зависимости от коэффициента ослабления радиоволн на частицах аэрозольного образования

Ключевые слова: аэрозольное образование, коэффициент ослабления радиоволн

Высокоточное оружие (ВТО) с неавтономными системами телеуправления в настоящее время и на ближайшую перспективу остаётся одним из наиболее эффективных и массовых средств поражения наземных целей в тактической глубине войск. В этих системах информация, необходимая для управления ВТО, извлекается из кодированных сигналов, поступающих от цели и пункта управления путём их передачи по каналу связи и несущих от оператора к ВТО команды об изменении его положения в пространстве [1-3].

В настоящее время к неавтономным системам телеуправления предъявляются требования по повышению скоростей полёта ракет до сверхзвуковых и расширению диапазона условий боевого применения (обеспечению возможности пуска ракет в любое время суток и в сложных метеорологических условиях) [4]. Одним из важнейших направлений, обеспечивающих реализацию этих требований, является создание противотанковых ракетных комплексов (ПТРК) с радиолокационными прицелами и радиолиниями управления (РЛУ) ракет, работающими в миллиметровом диапазоне длин волн (ММДВ) [1, 5, 6]. Типовыми представителями этих ПТРК являются комплексы типа TOW-2N, -2A RF, -2B RF, -2B Aero RF, -Bunker Buster RF, Red Arrow [1-6].

Радиолинии управления 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 [7]. Радиолинии управления обладают рядом особенно-

стей, 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.

Функционирование ПТРК происходит, как правило, в условиях естественных и преднамеренных аэрозольных помех (пыли, дымов и аэрозолей). Наличие аэрозольного образования (АО) на радиолинии управления ракетой может привести к искажениям полезного сигнала, его ослаблению и прерыванию.

Эффективность маскирующих аэрозольных помех радиолинии управления ракетой существенно зависит от пространственных и временных характеристик АО, а также характеристик ослабления радиосигналов управления в ММДВ. Ранее в работах [8-11] исследовалось влияние времени маскировки цели и прерывания сигнала управления ракетой на качество её наведения, а в [12-14] разработаны методики обоснования требований к оптическим характеристикам аэрозольного образования для случаев прерывания видения цели и сигнала управления ракетой. Воздействие помех, приводящих к прерыванию сигналов управления ракетой в ММДВ, ранее не рассматривалось.

Целью статьи является разработка методического аппарата обоснования требований к характеристикам аэрозольных помех для прерывания сигналов управления ракетой в ММДВ в зависимости от рассеивающих свойств аэрозольного образования.

Мощность полезного сигнала на входе приёмника $P_{ПРМ}$ определяется по формуле [15]

$$P_{ПРМ} = \frac{P_{ПРД} G_{ПРД} G_{ПРМ} \lambda^2}{(4\pi D_C)^2 L}, \quad (1)$$

где D_C – дальность радиоуправления ракетой; λ – длина волны; $G_{ПРД}$, $G_{ПРМ}$ – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн; $P_{ПРД}$ – выходная мощность передатчика; L – потери, обусловленные ослаблением сигнала в соединительных разъемах,

Калашников Михаил Григорьевич – ВУНЦ ВВС ВВА, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8-910-348-05-90
Керков Владимир Георгиевич – ВУНЦ ВВС ВВА, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8-980-556-19-71
Утемов Сергей Владимирович – ВУНЦ ВВС ВВА, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, тел. 8(473) 220-92-36

несовпадением поляризации антенн и т.п. ($L \approx 10$).

Дисперсия внутренних шумов приёмника системы радиоуправления ВТО определяется выражением [15]

$$\sigma_{Ш}^2 = KT_0 \Delta f K_{Ш}, \quad (2)$$

где K – постоянная Больцмана; T_0 – стандартная температура; Δf – эквивалентная шумовая полоса пропускания приёмника; $K_{Ш}$ – коэффициент шума приёмника.

Отношение сигнал/шум по мощности и дальность радиоуправления ракетой находятся по формулам:

$$q_{СШ}^2 = \frac{P_{ПРМ}}{\sigma_{Ш}^2} = \frac{P_{ПРД} G_{ПРД} G_{ПРМ} \lambda^2}{(4\pi D_C)^2 L K T_0 \Delta f K_{Ш}}, \quad (3)$$

$$D_C = \left(\frac{P_{ПРД} G_{ПРД} G_{ПРМ} \lambda^2}{q_{СШ}^2 (4\pi)^2 L K T_0 \Delta f K_{Ш}} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

При воздействии пассивных помех в виде облаков (завес) из углеродисто-волоконистых материалов (УВМ) выражение для отношения сигнал/помеха на входе приёмника системы РЛУ ракеты $q_{СП}^2$ может быть представлено в виде

$$q_{СП}^2 = \frac{P_{ПРД} G_{ПРД} G_{ПРМ} \lambda^2}{(4\pi D_C)^2 K_0 K T_0 \Delta f K_{Ш} L}, \quad (5)$$

где K_0 – коэффициент ослабления радиоволн на частицах аэрозольного образования при подавлении системы радиоуправления ракетой пассивными помехами из УВМ.

На рис. 1 приведена зависимость дальности радиоуправления ракетой от отношения сигнал/шум, рассчитанная в соответствии с выражением (4) для следующих типовых исходных данных:

а) при работе радиолинии управления на длине волны $\lambda=8,6$ мм: $P_{ПРД} = 5$ Вт; $G_{ПРД} = 2000$; $G_{ПРМ} = 5$; $K = 1,38 \times 10^{-23}$ Вт·с·К⁻¹; $T_0 = 290$ К; $\Delta f = 9 \times 10^8$ Гц; $K_{Ш} = 7$; $L = 10$;

б) при работе радиолинии управления на длине волны $\lambda=3,2$ мм: $P_{ПРД} = 5$ Вт; $G_{ПРД} = 5000$; $G_{ПРМ} = 25$; $T_0 = 290$ К; $\Delta f = 10^9$ Гц; $K_{Ш} = 12,5$; $L = 10$.

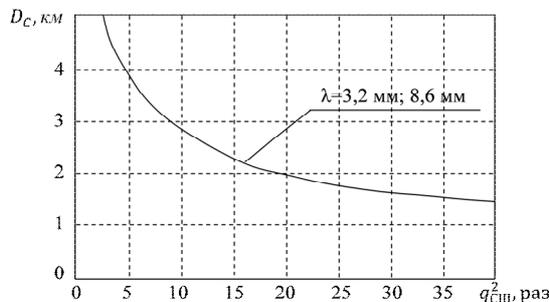


Рис. 1. Зависимость дальности радиоуправления ракетой от отношения сигнал/шум

Проведённая в [7] оценка помехоустойчивости РЛУ при использовании различных видов сигналов для передачи информации (сигналов с однополосной балансной, амплитудной и частотной модуляцией, амплитудной, частотной и фазовой манипуляцией, а также М-ичных сигналов ($M=64$)) показала, что эффективность подавления РЛУ для всех видов сигналов обеспечивается при отношении сигнал/помеха порядка 0,5.

На рис. 2 приведены рассчитанные в соответствии с выражением (5) зависимости отношения сигнал/помеха от коэффициента ослабления радиоволн на частицах аэрозольного образования для трёх значений дальности радиоуправления ракетой D_C .

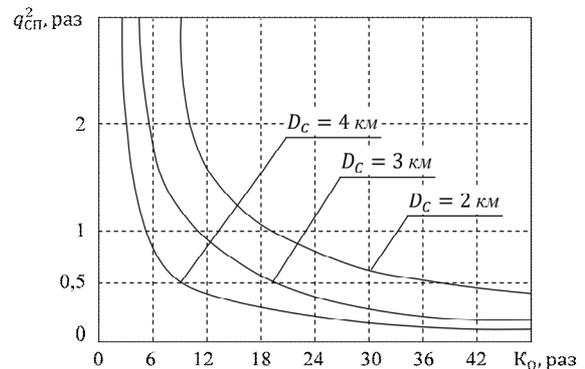


Рис. 2. Зависимости отношения сигнал/помеха от коэффициента ослабления радиоволн на частицах аэрозольного образования

Из анализа зависимостей, приведённых на рис. 2, следует, что при изменении дальности радиоуправления ракетой от 2 до 4 км коэффициент ослабления АО, требуемый для подавления системы радиоуправления ракетой, изменяется в пределах от 40 до 10 раз (от 16 до 10 дБ) соответственно. Очевидно, что для прерывания сигналов управления ракетой в ММДВ постановку АО целесообразно осуществлять при значениях дальностей радиоуправления ракетой $D_C \geq 4$ км. Это позволит обеспечить выполнение требований к АО из УВМ по эффективности прерывания сигналов управления и реализуемости.

Литература

1. Высокоточное оружие зарубежных стран. Т.1. Противотанковые ракетные комплексы. / Обзорно-аналитический справочник. – Тула: ООО «Издательская группа «Бедретдинов и Ко», 2008. – 564 с.
2. Борисов Е.Г., Евдокимов В.И. Высокоточное оружие и борьба с ним. / Учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 496 с.
3. Авиационные системы радиоуправления. Т.3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А.И. Канашенкова и В.И. Меркулова – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
4. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Оптические линии

связи малогабаритных управляемых ракет в условиях действия помех двигательных установок – М.: НТЦ «Информтехника», 2000. – 180 с.

5. Начало производства беспроводных ПТУР TOW. // Сборник научно-технической информации. – Тула, КБП, 2008. – № 1(23). – С. 63-66.

6. Противотанковые системы «РЭД ЭРРОУ». // Военно-техническое сотрудничество. – 2002. – № 32. – С. 56-58.

7. Ашимов Н.М. Потенциальная и реальная помехоустойчивость радиоприемных систем. // Радиоэлектроника. – 2001. – № 9. – С. 16-26.

8. Утемов С.В. Математическая модель сопровождения цели оператором окуллометрической системы при прерывании визуальной информации // Телекоммуникации. – 2011. – № 7. – С.20-24.

9. Утемов С.В., Ярмошевич Е.И., Михайлова Е.Е. Эффективность адаптивной к изменяющимся условиям наблюдения модели человека-оператора, осуществляющего визуальное сопровождение объекта // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – Т.4. – № 12. – С. 53-55.

10. Утемов С.В. Анализ качества функционирования неавтономной системы телеуправления ракетой при прерывании информации в контуре её управления. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – Т. 19. – № 5. – С. 29-36.

11. Прикладные задачи навигации, связи и управле-

ния. Методы анализа и синтеза. Монография. / Под ред. А.В. Коренного. // Е.А. Богословский, А.В. Журавлев, А.В. Коренной, А.В. Коровин, А.М. Межуев, В.А. Миرون, А.В. Нагалин, Г.С. Нахмансон, В.В. Неровный, А.В. Пономарев, С.Н. Разиньков, С.В. Утемов, Д.С. Юдаков. – М.: Радиотехника, 2015. – 160 с.

12. Утемов, С.В. Методика обоснования требований к оптическим характеристикам аэрозольного образования для прерывания видения цели оператором оптико-визуальной системы [Текст] / С.В. Утемов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – № 5. – С. 128-130.

13. Утемов С.В. Методика обоснования требований к оптическим характеристикам аэрозольных помех для прерывания видения цели оператором тепловизионной системы [Текст] / С.В. Утемов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – № 12. – С. 23-25.

14. Утемов С.В. Методика обоснования требований к оптическим характеристикам аэрозольного образования для прерывания сигнала управления объектом в лазерно-лучевой системе телеуправления [Текст] / С.В. Утемов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – № 11. – С. 31-32.

15. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. – М.: Сов. радио, 1968. – 448 с.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

TECHNIQUE OF THE SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS TO FACTOR OF EASING OF AEROSOL FORMATION FOR INTERRUPTION OF THE RADIO LINE OF MANAGEMENT

M.G. Kalashnikov, V.G. Kerkov, S.V. Utyomov

The methodical device is developed for a substantiation of requirements to characteristics of the aerosol hindrances leading to interruption of radio signals of management by a rocket in a millimetric range of lengths of waves. The estimation of the relation a signal/hindrance depending on factor of easing of radio-waves on particles of aerosol formation is spent

Key words: aerosol formation, factor of easing of radio-waves

ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ С УЧЕТОМ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А.В. Турецкий

Рассмотрены основные стадии процесса моделирования радиоэлектронных средств в системе Creo Parametric с использованием специализированного модуля Creo Parametric Mechanical. Показано применение предложенных процедур при проектировании модуля на печатной плате

Ключевые слова: радиоэлектронный модуль, нагрузка, механический анализ

При создании радиоэлектронного устройства, особенно специального назначения, образец на завершающих этапах проектирования обязательно подвергают ширококомасштабным испытаниям на климатические и механические воздействия, проявляющиеся при эксплуатации. Выявленные недостатки конструкции необходимо устранить и этот процесс бывает достаточно сложен и требует, подчас, серьезной переработки изделия. Гораздо целесообразнее заранее, на этапе проектирования методами компьютерного моделирования (САЕ-анализа) осуществлять проверку печатных плат на устойчивость к разного вида нагрузкам, в том числе и механическим. В этом случае количество доработок можно существенно уменьшить, сэкономив время и затраты на проектирование.

В радиотехнической промышленности применяются разные САПР высокого уровня, охватывающие большое количество стадий создания РЭС. Одной из таких систем является Creo Parametric (ранее Pro/Engineer Wildfire). К сожалению, указанная система не имеет возможности моделирования механических характеристик таких сложных узлов как многослойные печатные платы [1], в то время как они, во многом, определяют надежность всего устройства. Сама многослойная печатная плата представляет собой сложную конструкцию, состоящую из большого числа элементов: межслойных диэлектриков, коммутационных проводников, пленочных резисторов и конденсаторов, бескорпусных микросхем и др.

Сама задача моделирования представляется достаточно сложной из-за влияния большого числа факторов: материалов, технологии изготовления, конструкции и др. В тоже время при анализе механических свойств многослойных плат необходимо руководствоваться значениями допустимых нагрузок. Эти значения могут быть получены только в результате лабораторных испытаний тестовых образцов плат со статистической обработкой результатов.

В данной работе предлагается алгоритм процедур оптимального проектирования радиоэлектронных модулей путем исследования механических

характеристик многослойных печатных плат (рис. 1). Данный алгоритм использует в качестве критериев оценки механической надежности плат результаты испытаний тестовых образцов. Он учитывает предельные значения вибраций, ударов, статических нагрузок печатных плат с различными количеством слоев, выполненных из разных материалов по разной технологии. Похожий метод применялся в [2-5], применительно к радиоэлектронным модулям, относящимся к первому уровню разукрупнения.

Лабораторные испытания тестовых образцов многослойных печатных плат можно осуществлять согласно регламенту РС-ТМ-650 [6]. Указанная методика предусматривает комплекс механических и электрических испытаний, а также контроль геометрических размеров. Для ускорения процессов старения материалов в платах рекомендуется применять процесс термоциклирования по методу, представленному в [7]. Указанный метод включает в себя процесс нагрева изделий до определенных температур, выдержку и охлаждение, причем этот процесс повторяется неоднократно. Количество термоциклов зависит от условий эксплуатации: чем жестче условия, тем больше их количество.

Постановка задачи на оптимальное проектирование ставится в блоке №1. В соответствии с техническим заданием устанавливается перечень и уровень механических воздействий, которым подвергается разрабатываемое устройство в процессе эксплуатации.

Для осуществления процесса анализа механической надежности радиоэлектронного устройства собирается необходимая информация (блок №3). Необходимы данные о элементной базе, материалах и их характеристиках, а так же технологии изготовления многослойной платы. Определяются наиболее уязвимые места конструкции с точки зрения механической надежности.

Информация поступает из постоянно обновляемой базы данных (блок №2), которая содержит данные о вибрационных, ударных и тепловых характеристиках активной и пассивной элементной базы. В ней также имеются сведения о физико-химических свойствах конструкционных материалов радиоэлектронных средств и печатных платах.

Турецкий Андрей Владимирович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(906)677-51-29, e-mail: tav7@mail.ru

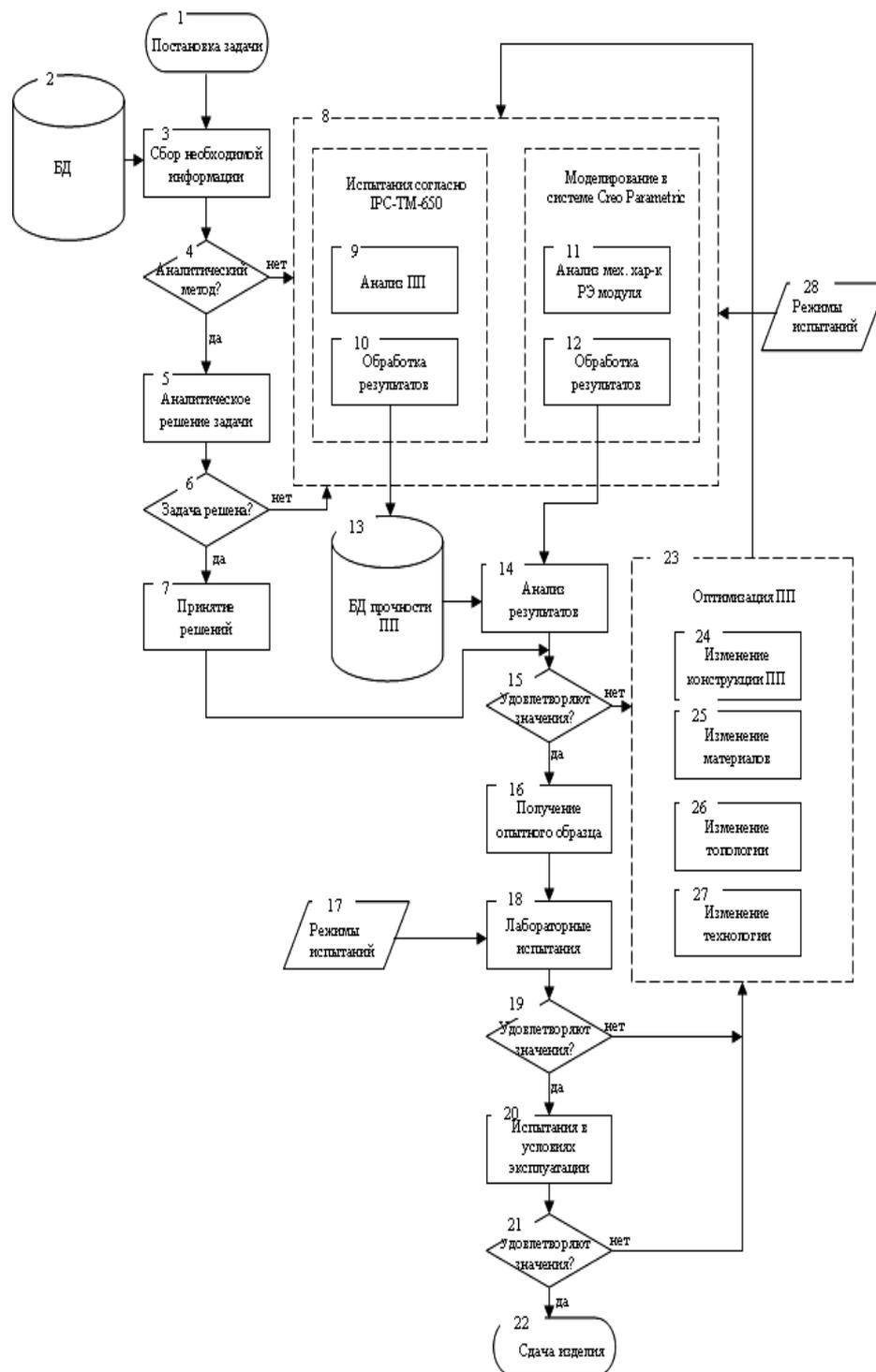


Рис. 1. Алгоритм комплексного анализа механических характеристик печатных плат в составе радиоэлектронных модулей

Процесс проектирования может идти по двум сценариям. Если конструкция является простой, то для ускорения процесса моделирования может применяться аналитический метод. В то же время в более сложных случаях, коих большинство, применяется метод CAE анализа. Выбор пути производится в блоке № 4.

Аналитическое решение задачи (блок №5) включает в себя применение математических моде-

лей для типовых способов крепления платы. Это такие как жесткое защемление, свободное опирание или незакрепленный край пластины или балки.

Результатом аналитического решения является определение собственных частот колебаний конструкции платы, значения напряжений в отдельных участках конструкции при влиянии статических нагрузок и ударов.

В блоке №6 происходит проверка достаточности результатов аналитического решения. Если результаты удовлетворяют проектировщика, то принимается решение о дальнейшем процессе проектирования. Если же аналитический расчет не дал достаточно точных и однозначных результатов или конструкция устройства не позволяет применить аналитические методы, используют инструменты инженерного анализа на основе метода конечных элементов (блок № 8).

Для применения этого метода необходимо иметь 3 D модель конструкции разрабатываемого устройства. В соответствии с техническим заданием на конструкцию накладываются ограничения в виде закреплений, нагрузок и материалов и выполняется собственно моделирование (блок № 11). В качестве основы взята система Creo Parametric включающая в себя модули CAE анализа. Имеется возможность выполнять наиболее распространенные виды моделирования механических нагрузок (статический, модальный и динамический анализы).

В соответствии с требованиями технического задания выбираются необходимые режимы испытаний (блок № 28).

У системы Creo Parametric имеется мощный постпроцессор, позволяющий представить результаты анализа в виде диаграмм и графиков (блок № 12). Имеется возможность определения напряжений в различных участках конструкции с выявлением проблемных мест.

Блок № 8 также содержит процедуры тестовых лабораторных испытаний образцов печатных плат по международному стандарту IPC-TM-650 [6]. Проводится анализ механических свойств различных образцов плат, различающихся по конструкции и технологии изготовления (блок № 9). Затем полученные данные в блоке № 10 подвергаются статистической обработке и наполняют в специализированную базу данных (блок № 13). В нее заносятся данные о предельных значениях вибрации, ударов и статических напряжений печатных плат с разным конструктивным исполнением, разного класса точности и технологии изготовления. Стоит также отметить, что лабораторные испытания одного вида плат можно провести единожды и затем данные использовать в большом количестве проектов, реализуемых на отдельных предприятиях или даже концернах.

После выполнения CAE анализа в блоке № 14 происходит проверка результатов с использованием базы данных (блок № 13). Если полученные значения механических напряжений превышают предел надежной работы устройства или собственные частоты лежат в области эксплуатационных, то принимается решение об оптимизации конструкции платы (блок №23). Изменение конструкции может идти по пути модификации конструкции (блок № 24), использованию материалов с другими характеристиками (блок № 25), изменению топологии (блок № 26) или применению другой технологии изготов-

ления платы (блок № 27). После этого также проводится весь цикл CAE анализа (блоки 11, 12).

В случае удовлетворения результатами моделирования (блок № 15) принимается решение об изготовлении опытного образца устройства (блок № 16) и испытаниях его на вибрационных стендах (блок № 18). При этом применяются установленные стандартом режимы (блок № 17).

В блоке № 19 происходит проверка соответствий механических характеристик выпускаемого изделия требуемым значениям. Если конструкция не прошла испытания, то оптимизируют конструкцию (блок 23) с созданием модернизированного опытного образца.

Если конструкция прошла лабораторные испытания, то проводят испытания в реальных условиях эксплуатации (блок № 20), где на конструкцию также действуют другие факторы, влияющие на надежность (влага, грязь, солевой туман и др.).

В блоке № 21 проверяется соответствие характеристик проектируемого изделия требованиям технического задания, и в случае положительного решения происходит сдача изделия заказчику (блок № 22). В противном случае опять необходим процесс модернизации конструкции.

В качестве примера реализации данной методики проведено моделирование радиоэлектронного модуля на механические характеристики. Радиоэлектронный модуль представляет собой одноплатную конструкцию, имеющую четыре штатных отверстия для крепления и восемь отверстий для фиксации жидкокристаллических индикаторов двух типов. На поверхности платы располагаются также светодиоды, электрические соединители и другие компоненты.

В первоначальном варианте плата жестко закреплена по 4 существующим отверстиям и на поверхность подана нагрузка величиной 10 Н перпендикулярно плоскости платы.

Creo Parametric имеет возможность автоматически генерировать сетку конечных элементов. Внешний вид закрепленной платы с элементами сетки представлен на рис.2.

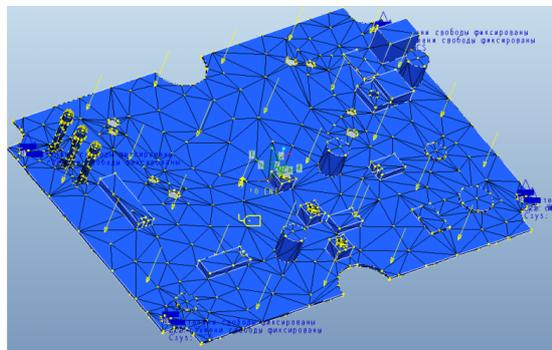


Рис. 2. Закрепленная плата с элементами сетки

Величина элементов сетки влияет на точность моделирования. Чем меньше размер конечного элемента сетки, тем выше точность, однако это приводит к значительному увеличению времени анализа,

что требует серьезных ресурсов вычислительных платформ. В Creo Parametric имеется возможность изменения размеров сетки в различных элементах конструкции. Там, где необходима повышенная точность, размер элементов уменьшают, в то время как у остальных элементов размер может быть значительно больше.

Результат моделирования статического режима представлен на рис. 3. Чем светлее контур, тем больше прогиб платы.

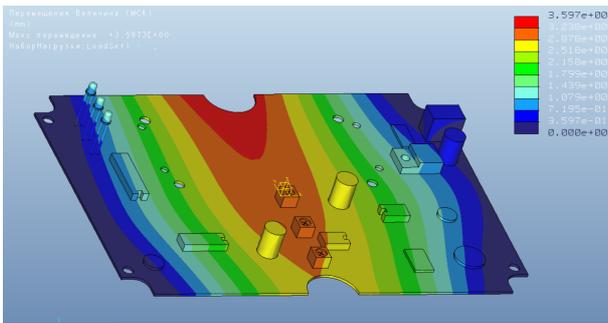


Рис. 3. Структурный анализ, результаты статика

Анализируя результаты, представленные на рис. 3. можно сказать, что максимальное перемещение участков платы наблюдается в ее середине и составляет 3,5 мм, что является большой величиной. Характерно также наличие неравномерно нагруженных участков из-за схемы крепления платы. Выявлено также повышенное напряжение участков платы в области отверстий, составляющие по Фон Мизесу 40 МПа.

Модальный анализ показал, что первый резонанс появляется на уровне 62 Гц (рис. 4), что является неприемлемым, так как эксплуатационные частоты имеют верхний уровень в 120 Гц. По условиям эксплуатации необходимо иметь 2-2,5 кратный запас по нижней границе резонансной частоты и для выполнения условия механической прочности при воздействии внешней вибрации, необходимо провести оптимизацию конструкции.

Для увеличения собственных частот необходимо более жесткое крепление платы, применение материалов с лучшими прочностными характеристиками или уменьшение площади платы. Уменьшить площадь платы не представляется возможным, так как она имеет довольно плотную компоновку, а применение иных материалов серьезно удорожает конструкцию. Поэтому процесс оптимизации пошел по пути увеличения жесткости крепления платы.

В процессе проектирования радиоэлектронного модуля проработано 5 вариантов конструкции. Окончательный вариант представлен на рис. 5. Плата закреплена по 8 существующим отверстиям и по 2 дополнительным отверстиям в середине.

Также выявлено, что резонируют также светодиоды. Принято решение закрепить концы светодиодов в крышке.

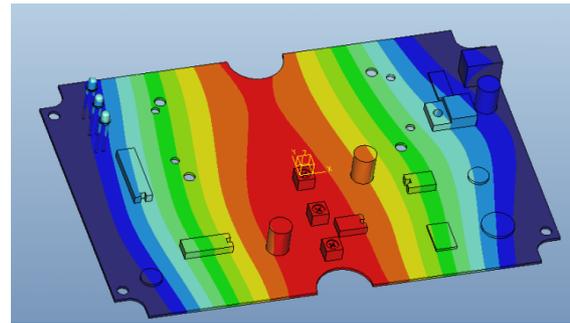


Рис. 4. Модальный анализ первой резонанс платы 62 Гц

Результаты статического и модального анализа оптимизированного варианта конструкции представлены на рис. 6-7.



Рис. 5. Пятый вариант конструкции закреплено 10 отверстий и 3 светодиода

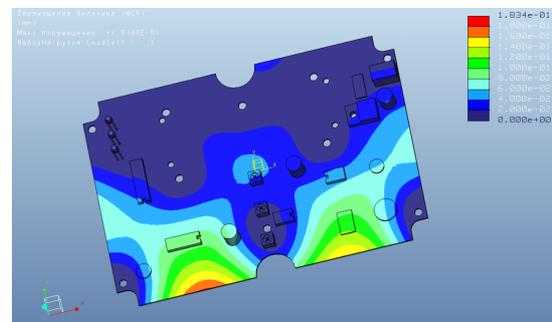


Рис. 6. Результат анализа статического режима окончательного варианта конструкции

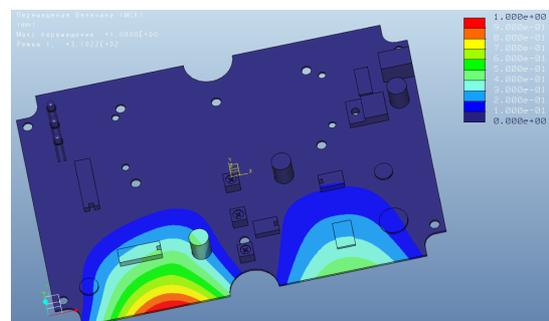


Рис. 7. 1 резонанс 310 Гц (5 вариант конструкции)

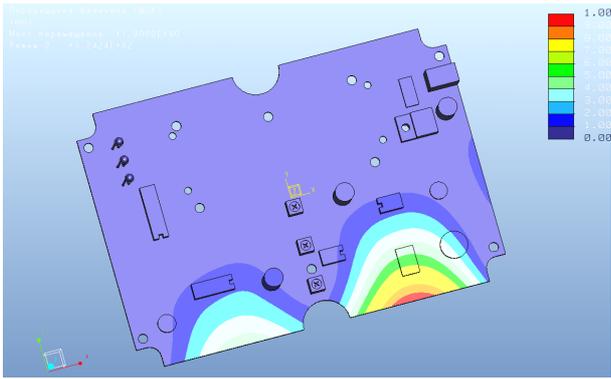


Рис. 8. 2 резонанс 324 Гц
(5 вариант конструкции)

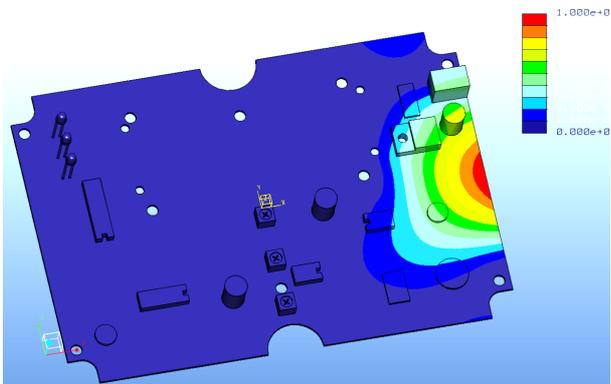


Рис. 9. 3 резонанс 362 Гц
(5 вариант конструкции)

Анализируя рис. 6 можно сказать, что максимальное перемещение участков платы составляет 0,18 мм, что является небольшой величиной.

Результаты анализа резонансных частот показывают, что их величины больше максимальных эксплуатационных 120 Гц более чем в 2 раза.

По результатам принято решение о создании опытного образца и дальнейшего испытания устройства.

Предложенная методика позволяет значительно ускорить процесс разработки радиоэлектронных изделий. Этому способствуют два фактора. Первый фактор заключается в системном применении

Воронежский государственный технический университет

средств САЕ анализа а также систем автоматизированного проектирования. Второй фактор состоит в наличии специализированной пополняемой базы данных, содержащей сведения о предельных механических нагрузках печатных плат разных конструкций.

На многих российских предприятиях, занимающихся проектированием радиоэлектронных средств, как правило, существует большая номенклатура разрабатываемых изделий, у которых применены типовые конструкции печатных плат с унифицированными размерами. Применение предложенных процедур на предприятии позволит всем отделам пользоваться этой базой без проведения дополнительных лабораторных испытаний.

Литература

1. Муратов, А.В. Современные технологии повышения интеграции и микроминиатюризации радиоэлектронных модулей с указанием возможных вариантов их совершенствования [Текст] / А.В. Муратов, С.В. Иванов, Д.А. Корчагин // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2010. -Т. 6. -№ 12. -С. 130-134.
2. Лозовой, И.А. Методика анализа радиоэлектронных модулей на механическую прочность [Текст] / И.А. Лозовой, А.В. Турецкий. // Радиотехника. -2013. -№3. -С. 85-88.
3. Лозовой, И.А. Подсистема испытания паяных соединений электронных компонентов на механические воздействия [Текст] / И.А. Лозовой, А.В. Турецкий // Радиотехника. - 2012. - №8. - С. 80-84.
4. Лозовой, И.А. Методы испытания паяных соединений поверхностно монтируемых компонентов на механические воздействия [Текст] / И.А. Лозовой, А.В. Турецкий, В.А. Шуваев // Радиотехника. - 2012. - №8. - С. 76-80.
5. 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.
6. IPC-TM-650 Test Methods Manual.
7. Князев, А. Испытания надежности печатных плат при помощи термоциклирования и термоудара [Текст] / А. Князев, С. Борисенков // Технологии в электронной промышленности, № 1, 2008 С. 21-24.

THE OPTIMAL DESIGN OF RADIO ELECTRONIC MODULE IN VIEW OF MECHANICAL ACTION

A.V. Turetsky

The main stage of the process simulation of electronic modules in the system Creo Parametric with specialized module Creo Parametric Mechanical. Results using the proposed procedures for the design of the module PCB

Key words: the radio-electronic module, loading, the mechanical analysis

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СБОЕВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

А.Б. Токарев, А.А. Саликов, А.В. Муратов

Повышение качества функционирования систем цифрового телевидения требует периодического контроля соответствия передаваемой информации требованиям, предъявляемым к цифровому видеоконтенту. Для оперативного устранения проблем передачи данных необходим механизм выявления сбоев формирования видеоизображения. В статье предлагаются статистики, позволяющие автоматизировать обнаружение подобных сбоев

Ключевые слова: радиоконтроль, видеокадр, признаки сбоев формирования изображения

Введение

Активно развивающийся в последние годы процесс замены аналогового телевидения цифровым связан, в частности, с успехами развёртывания гибридных, или волоконно-коаксиальных сетей (англ. HFC — hybrid fibre-coaxial), в которых сочетаются коаксиальные и волоконно-оптические кабели, и с внедрением в практику новых стандартов передачи данных, подобных стандарту цифрового телевидения DVB, либо двустороннему, интерактивному стандарту DOCSIS. Используемое для передачи данных сетевое оборудование обязано функционировать в соответствии с протоколами DOCSIS, которые предусматривают инкапсуляцию всех имеющихся во входящем потоке данных в кадры MPEG-2. Эти кадры могут содержать реальные видео- и аудиоданные, которые, как правило, декодируются и представляют собой ТВ-изображения и звуковой сигнал; они могут содержать также данные, которые декодируются и представляют собой информацию для компьютера (т.е. информацию Интернет). На текущий момент активно используется второе поколение стандартов DVB, которое включает три основных транспортных стандарта, обслуживающих три главные транспортные среды – DVB-S2 (спутниковый), DVB-T2 (эфирный) и DVB-C2 (кабельный) [1].

В новом кабельном стандарте внутри одного физического канала предусмотрено выделение транспортных потоков, получивших название Physical Layer Pipe. PLP — это логический канал, который может переносить обычный поток MPEG-2 TS или использоваться для передачи IP с применением протокола

Generic Stream Encapsulation (GSE). Стандарт DVB-C2 предусматривает весьма эффективное помехоустойчивое кодирование LDPC, позволяющее восстанавливать декодером поток данных даже при плотности ошибок в несколько процентов. Тем не менее, гарантировать, что каждый пользователь сети будет получать безошибочный, качественный с технических позиций видеоконтент проблематично. Для повышения надёжности системы необходим механизм выявления отказов в работе оборудования, который мог бы способствовать оперативному принятию мер по устранению наблюдаемых неполадок. В последующей части статьи приводятся рекомендации по формированию подобного механизма контроля качества получаемого пользователями цифрового видеосигнала.

Типы сбоев телевизионного изображения и способы их распознавания

Передаваемый в HFC-сетях видеоконтент представляет собой поток кадров видеоизображения, поэтому и распознавание сбоев передачи видеоданных осуществляется на основе анализа характеристик отдельных кадров изображения или их последовательности.

К примеру, появление черного или белого полей можно распознавать по единственному кадру изображения на основе оценки его средней яркости

$$B = \frac{1}{WH} \cdot \sum_{k=0}^{W-1} \sum_{\ell=0}^{H-1} p_{xl}(k, \ell) \quad (1)$$

где B – оценка средней яркости изображения, W и H – выраженные в пикселях ширина и высота изображения, $p_{xl}(k, \ell)$ – массив элементов изображения, характеризующих яркость его отдельных пикселей. Принятие оценкой B значения ниже некоторого порога H_{black} может служить признаком отображения черного поля, а выполнение условия $B > H_{white}$ при достаточно

Токарев Антон Борисович – ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru, тел.

8 (920) 4665525
Саликов Александр Александрович – ВГТУ, аспирант, тел. 8 (950) 7621924

Муратов Александр Васильевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 243-77-30

высоком пороге H_{white} указывает на отображение белого поля.

При статичной заливке экрана фоном другого цвета использовать подобное (1) распознавание не удаётся, однако ниже будет приведен способ диагностирования отсутствия реального видеоизображения, основанный на выявлении статичности отображаемых видеокадров.

Другим типовым вариантом некорректного видеоизображения, подлежащим автоматическому распознаванию, является «шумовая картинка», подобная представленной на рис. 1 слева. Для выявления подобных шумовых видеокадров может быть полезен двумерный спектр

$$F(m, n) = \sum_{k=0}^{W-1} \sum_{\ell=0}^{H-1} p_{xl}(k, \ell) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \left(\frac{m \cdot k}{W} + \frac{n \cdot \ell}{H} \right)}. \quad (2)$$

Шумовым видеокадрам будет соответствовать спектр, содержащий дельта-функцию в начале координат и равномерно распределенную интенсивность прочих спектральных составляющих. Если исключить из рассмотрения эту дельта-функцию, приравняв $F(0, 0) = 0$, и после этого рассчитать математическое ожидание абсолютной величины отсчетов спектра изображения

$$M_{|F|} = \frac{1}{WH} \cdot \sum_{m=0}^{W-1} \sum_{n=0}^{H-1} |F(m, n)|, \quad (3)$$

то можно ожидать, что нормированная дисперсия модулей спектральных составляющих

$$D_{|F|} = \frac{1}{WH \cdot M_{|F|}^2} \sum_{m=0}^{W-1} \sum_{n=0}^{H-1} \left(|F(m, n)| - M_{|F|} \right)^2 \quad (4)$$

для шумовых видеокадров будет близкой к нулю. И действительно, контроль близости к нулю статистики (4) позволяет уверенно отличать шумовые видеокадры (рис. 1, слева) от зашумленных, но всё же, формально, корректных изображений (рис. 1, справа).

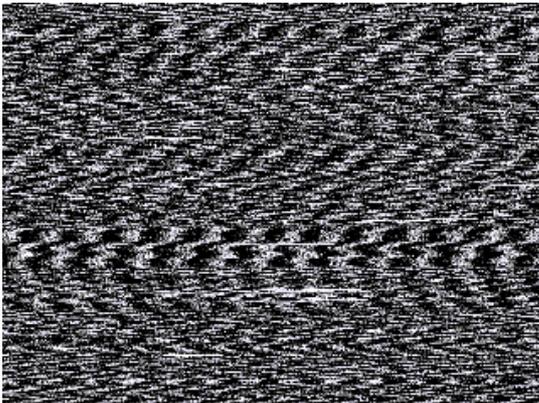


Рис. 1. Примеры шумового и зашумленного видеокадров

Вместе с тем, практическая апробация статистики (4) продемонстрировала её уязвимость к некоторым типам изображений. Например, для кадра, представленного на рис. 2 слева её значение оказывается близким к нулю, несмотря на то, что само изображение является вполне информативным и высококачественным. Причиной подобного эффекта является насыщенность изображения мелкими, хаотично расположенными элементами. Раскиданные по траве осенние листья создают «шумовой ковёр», на который и реагирует статистика (4). При оценке же этого изображения человеком на первое место по значимости выходит пластмассовая фигурка в центре кадра, наличие которой статистика (4) игнорирует.

Доработка статистики может заключаться в разбиении кадра на отдельные фрагменты, анализируемые независимо. Шумовой кадр при этом распадётся на шумовые же фрагменты, по-прежнему, успешно классифицируемые при помощи (4), а фрагменты кадра, содержащие достаточно крупные, упорядоченные элементы изображения, будут при этом автоматически распознаны как полезное изображение. Таким образом, рекомендуемая к практическому использованию процедура выявления шумовых кадров изображения состоит в следующем:

1) кадр изображения разбивается на $R \cdot C$ фрагментов, для каждого из которых независимо рассчитывается двумерный спектр

$$F_{c,r}(m, n) = \sum_{k=cw}^{(c+1)w-1} \sum_{\ell=rh}^{(r+1)h-1} p_{xl}(k, \ell) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \left(\frac{m \cdot k}{w} + \frac{n \cdot \ell}{h} \right)} \quad (5)$$

(здесь $w = W / C$ и $h = H / R$ – ширина и высота фрагментов изображения) и статистика

$$D_{|F_{c,r}|} = \frac{\sum_{m=0}^{w-1} \sum_{n=0}^{h-1} \left(|F_{c,r}(m, n)| - M_{|F_{c,r}|} \right)^2}{wh \cdot M_{|F_{c,r}|}^2} \quad (6)$$

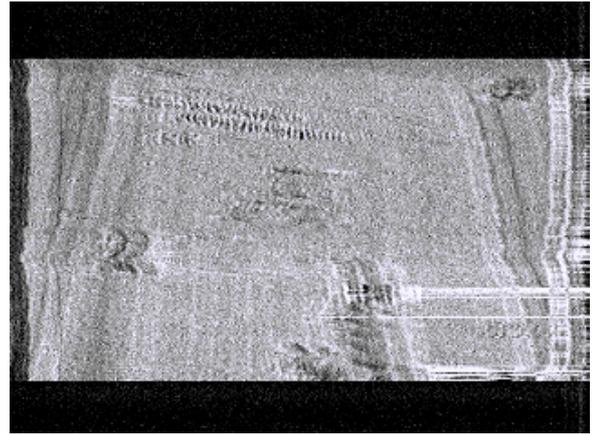


Рис. 2. Примеры «псевдошумового» и пограничного по качеству изображений

2) если хотя бы для одного из фрагментов кадра справедливо

$$D_{|F_{c,r}|} > H_{white_noise}, \quad (7)$$

то кадр в целом считается несущим полезное изображение, и лишь при близких к нулю значениях статистики (6) для всех $R \cdot C$ фрагментов кадр признаётся шумовым.

Возможным недостатком разработанного выше правила (7) может стать его способность считать «корректными» изображения, подобные представленным на рис. 2 справа. Вместе с тем подобные кадры и не являются формально «чисто шумовыми»; кроме того, чувствительность правила (7) к шумовым изображениям можно регулировать подбором порога принятия решения H_{white_noise} .

Ещё одним вариантом сбоя видеоконтента в HFC-сетях является замирание телевизионного изображения. Причиной замирания может быть как приостановка потока данных, которая легко диагностируется без анализа содержимого видеокладов, так и неподвижность «картинки», транслируемой в телевизионную сеть.

Учитывая погрешности оцифровки, в последнем случае цифровые данные в разных видеокадрах не будут идентичны друг другу, поэтому для обнаружения замираний потребуется сравнивать изображения на соседних кадрах. Для этого можно рекомендовать вычисление взаимной корреляции изображений

$$R_{12}(k, \ell) = \frac{1}{WH} \left| \sum_{m=0}^{W-1} \sum_{n=0}^{H-1} M(m, n) \cdot e^{j \cdot 2\pi \left(\frac{mk}{W} + \frac{n\ell}{H} \right)} \right| \quad (8)$$

где $M(m, n) = F_1(m, n) \cdot F_2^*(m, n)$ – произведение комплексного спектра $F_1(m, n)$ первого изображения на величину комплексно-сопряженную спектру $F_2(m, n)$.

Признаком замирания изображения может служить выполнение условия

$$\frac{\max_{k, \ell} R_{12}(k, \ell)}{\min \{ R_1(k, \ell), R_2(k, \ell) \}} > H_R, \quad (9)$$

где знаменатель берётся равным минимальному из автокорреляционных пиков сравниваемых изображений, а чувствительность алгоритма к замираниям определяется выбором порога H_R .

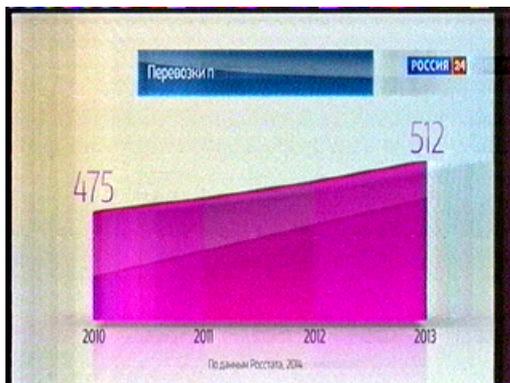


Рис. 3. Статичные изображения при излишне длительном отображении свидетельствуют о неполадках в сети

Внедрение статистик для распознавания сбоев передачи цифрового видеозображения

Описанные выше процедуры контроля качества видеоконтента хотя и не являются чрезмерно трудоёмкими, но всё же требуют заметных затрат временных и аппаратных ресурсов. Однако следует иметь в виду, что обсуждаемый контроль не требуется осуществлять непрерывно; тестирование каждого канала с интервалом в несколько секунд, как правило, обеспечивает вполне надёжное обнаружение сбоев передачи данных. Подобная периодичность позволяет не только обойтись при тестировании достаточно скромными аппаратными ресурсами, но и контролировать параллельно качество функционирования обширного набора каналов.

Учитывая унификацию потоков данных, предложенные выше процедуры контроля могут быть использованы как в системах кабельного (DVB-C2), так и эфирного (DVB-T2) цифрового телевидения. Контроль эфирного канала предполагает при этом реализацию предложенных выше алгоритмов системами радиомониторинга, подобными описываемым в [2]. В частности, компанией АО ИРКОС к настоящему моменту разработан и успешно внедряется в практику транспортируемый необслуживаемый комплекс автоматизированного контроля телевизионного и радиовещания АРК-ТВРВ. Этот комплекс обеспечивает не только контроль наличия информационной составляющей ТВ и РВ сигналов, но и запись демодулированных ТВ и РВ сигналов, одновременный контроль до 16 аналоговых и до 20 цифровых телевизионных и радиоканалов с регистрацией контента и параметров по заданным триггерным событиям, а также ряд специализированных измерений, нацеленных на поиск причин возникновения сбоев и их оперативное устранение.



Рис. 4. Внешний вид комплекса АРК-ТВРВ

Литература

1. Цифровое вещание. Стандарты цифровых систем кабельного телевидения. Введение – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://5fan.ru/wievjob.php?id=6996>.
2. Рембовский, А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин; под ред. А.М. Рембовского. - 3-е изд., перераб. и доп. – М: Горячая линия-Телеком, 2012. – 640 с.

Воронежский государственный технический университет

AUTOMATION OF FAULT RECOGNITION IN DIGITAL TELEVISION NETWORKS

A.B. Tokarev, A.A. Salikov, A.V. Muratov

Improving the quality of functioning of digital television systems requires to control the parameters of transmitted video image periodically and to compare them with the requirements to digital video content. A mechanism is needed to detect the video frames formation failure and eventually to quick troubleshoot data transfer problems. The article offers some statistics that can automate the detection of such video data transfer faults

Key words: radio monitoring, video image, bad video frame indicator

АДРЕСНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ В РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ

Д.А. Алексеев, С.Ю. Белецкая, А.Б. Токарев

Сбор данных для разностно-дальномерной системы и иных подобных систем часто осложняется фактом сосуществования в анализируемых полосах частот множества однотипных источников, излучающих подлежащие обработке сигналы асинхронно по отношению друг к другу. Предложена процедура адресной обработки подобных сигналов. Приведены краткие результаты эксперимента по определению координат нескольких воздушных целей разностно-дальномерной системой с базой в несколько километров

Ключевые слова: адресная обработка сигналов, радиоконтроль, разностно-дальномерный метод

Введение

В последние годы для решения задачи определения координат (ОК) источников радиоионизирующих (ИРИ) часто применяют разностно-дальномерный метод ОК, который на английском языке получил название TDOA – Time Difference Of Arrival [1]. Одной из причин роста интереса к использованию разностно-дальномерных систем является уменьшение длительности и увеличение ширины спектра применяемых в радиотехнической практике сигналов. Именно применительно к таким широкополосным радиоизлучениям малой длительности TDOA-системы оказываются очень эффективными.

Разностно-дальномерные системы (РДС) осуществляют ОК ИРИ, базируясь на измерении разницы времени прихода радиосигналов от ИРИ на несколько отстоящих друг от друга приемных постов (ПП). Для обеспечения синхронизации локальных шкал времени входящих в систему РДС постов могут быть использованы высокостабильные опорные генераторы, синхронизируемые по PPS-сигналам, получаемым от тайминговых GPS-приёмников [2]. При обработке потока PPS-сигналов фильтром Калмана такой подход позволяет достигать синхронизации шкал времени ПП с рассогласованием не более ± 30 нс, что, как правило, достаточно для достижения высокой точности при ОК ИРИ.

Для достижения высокой точности ОК желательно также, чтобы ИРИ находился внутри многоугольника, охватываемого ПП, и

чтобы на каждом ПП принимаемые сигналы наблюдались с достаточно высоким отношением сигнал-шум [3-4]. Эти два условия – противоречивы, т.к. очевидным способом выполнения первого из них является разнесение ПП на большое расстояние друг от друга, но при этом наблюдаемые отношения сигнал-шум будут неизбежно снижаться. Технически эффективным способом преодоления указанного противоречия является построение обширной сети ПП, плотно покрывающей обслуживаемую территорию, однако его широкому практическому применению мешает значительная стоимость подобной сети. Как следствие, реальные РДС часто включают в свой состав от 3 до 5–6 ПП, территориальное разнесение которых определяется классами анализируемых ИРИ. Сведения, приводимые в последующей части работы получены для РДС минимального объема, ориентированной на обработку сигналов телевизионных и радиовещательных передатчиков и состоящей из трёх ПП, разнесенных друг от друга в условиях города на несколько километров. Следует признать, что для ОК воздушных целей подобное расположение ПП не является идеальным, поскольку большинство целей оказываются далеко за пределами многоугольника ПП, однако такая РДС вполне подходит для отладки адресной обработки сигналов при ОК.

Цели и способы осуществления адресной обработки сигналов

Хотя формально для ОК при разностно-дальномерной обработке достаточно единственного комплекта взаимных задержек сигналов, не следует забывать, что измерение задержек сопровождается ошибками, величина которых зависит от точности синхронизации постов системы, неидентичности трактов приема ПП, от отношения сигнал-шум и интерференционной картины, складывающейся в местах уста-

Алексеев Дмитрий Александрович – ВГТУ, аспирант, тел. 8 (920) 4063748
Белецкая Светлана Юрьевна – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (473) 243-77-04
Токарев Антон Борисович – ВГТУ, д-р техн. наук, доцент, e-mail: TokarevAB@ircoc.vrn.ru, тел. 8 (920) 4665525

новки приёмных антенн. Влияние большинства из перечисленных факторов проявляется в устойчивых по величине поправках. Соответствующие ошибки можно лишь частично уменьшить за счет калибровки аппаратуры. Погрешности же, вызываемые шумом, носят флуктуационный характер и могут быть заметно снижены за счет обработки результатов многократных измерений. Однако на практике организации многократных измерений часто препятствует факт сосуществования в обрабатываемом диапазоне частот сигналов от многих однотипных целей. В частности, при обработке самолётных сигналов следует учитывать, что в конкретный момент времени в зоне действия каждого из постов РДС может находиться сразу несколько целей, излучающих однотипные сигналы асинхронно по отношению друг к другу. И простое, безадресное накопление данных почти наверняка приведёт к ошибочной совместной обработке сигналов, принадлежащих разным источникам. Таким образом,

применение многократных измерений должно подразумевать адресную обработку, обеспечивающую правильную «привязку» наблюдаемых сигналов к каждому из совокупности ИРИ, действующих в обрабатываемом диапазоне частот.

Адресная обработка неразрывно связана с детальным учётом и использованием структуры принимаемых сигналов. Отдельные элементы структуры ADS-B сигналов [5], излучаемых воздушными целями, показаны на рис. 1. Сообщения, располагающиеся после стандартизированной преамбулы, в своей информационной части, формируемой с помощью импульсного кодирования (код Манчестера), содержат, в частности, идентификационный номер самолета (DATA BLOCK: биты 9...32). Следовательно, радиоимпульсы, характеризующиеся одинаковой последовательностью соответствующих бит, гарантированно принадлежат одному и тому же ИРИ, а потому могут и должны обрабатываться совместно.

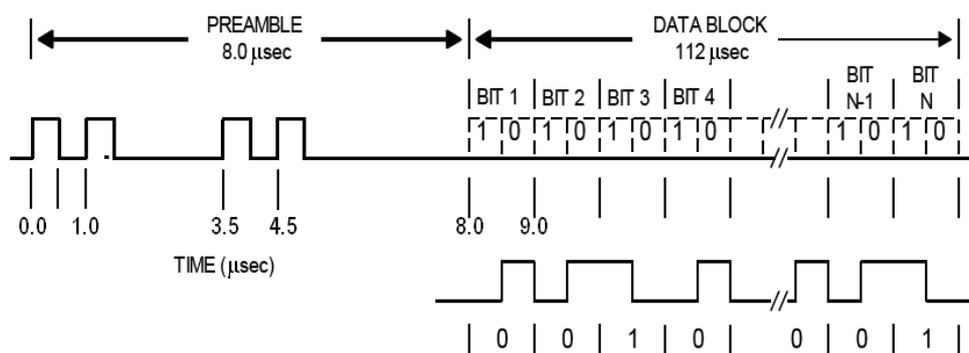


Рис. 1. Структура ADS-B сигнала

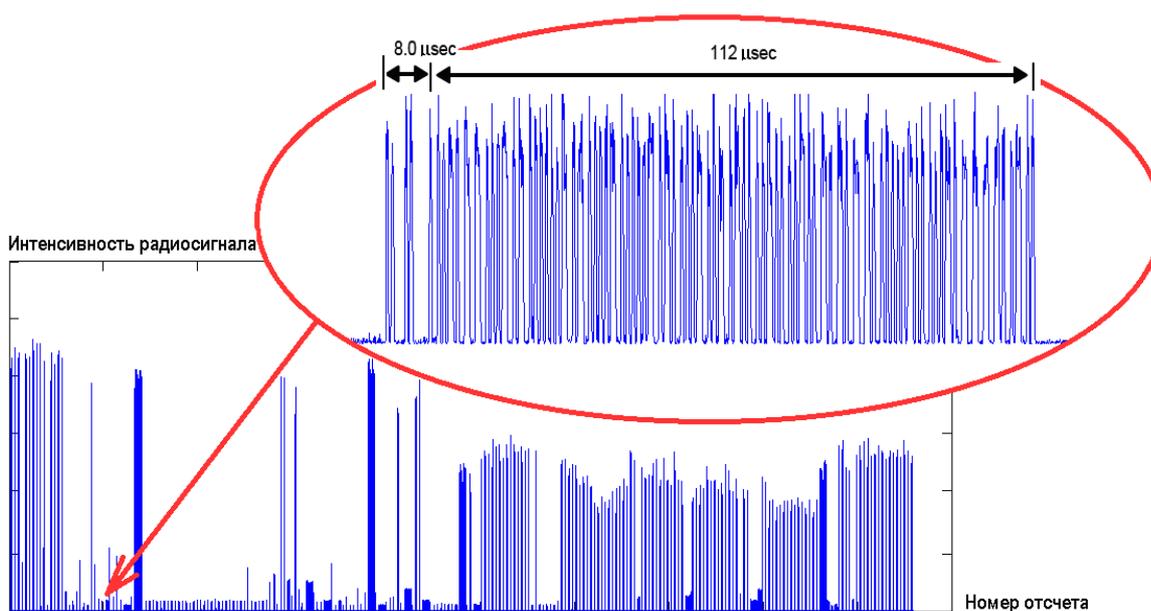


Рис. 2. Изменение интенсивности радиоимпульсов, наблюдаемых в канале управления воздушным движением

Итак, при приёме и оценивании взаимных задержек ADS-B сигналов адресная обработка предполагает получение потока отсчетов огибающей радиоизлучения на частоте 1090 ± 4 МГц, синхронизацию с преамбулами ADS-B сигналов и вычленение последовательностей бит, кодирующих идентификационный номер самолёта. Учитывая, что предписываемое стандартом изменение интенсивности огибающей носит бинарный характер, свёртку потока отсчетов с импульсной характеристикой согласованного фильтра можно заменить скользящим суммированием групп отсчетов, соответствующих расположению импульсов в преамбуле ADS-B сигнала. При импульсном кодировании кодом Манчестера изменения состояния сигнала происходят через $1/2$ элемента, т.е. через 0,5 мкс и искомую преамбулу можно записать как последовательность полубит $v = "10 10 00 01 01 00 00 00"$, где длительность отдельного полубита составляет 0,5 мкс, поэтому статистика, используемая для выявления преамбулы, может быть записана в виде

$$Z(k) = \text{sum}(k, B_{-7}, B_{-6}) + \text{sum}(k, B_{-9}, B_{-8}) + \text{sum}(k, B_{-14}, B_{-13}) + \text{sum}(k, B_{-16}, B_{-15}), \quad (1)$$

где $B_\ell = \text{floor}(\ell \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot F_s)$ – соответствующий частоте дискретизации F_s интервал в отсчетах до границы ℓ -го полубайта,

$$\text{sum}(k, \text{start}, \text{stop}) = \sum_{i=k+\text{start}}^{k+\text{stop}-1} A[i], \quad (3)$$

– сумма, размещающихся на интервале от start до stop отсчетов огибающей принимаемого радиоизлучения.

При этом, если k -й отсчет действительно соответствует моменту t_0 окончания преамбулы и началу информационного блока, то сумма

$$Z_u(k) = \text{sum}(k, B_{-6}, 0) + \text{sum}(k, B_{-8}, B_{-7}) + \text{sum}(k, B_{-13}, B_{-9}) + \text{sum}(k, B_{-15}, B_{-14}) \quad (4)$$

должна обеспечивать суммирование отсчетов шума, заполняющего промежутки между импульсами преамбулы. Измеряемая микросекундами продолжительность преамбулы означает крайне низкую вероятность существенного изменения условия распространения радиосигнала, а потому наблюдаемая интенсивность огибающей от импульса к импульсу практически не должна изменяться. Всё вместе это означает, что правило принятия решения о соответствии k -го отсчета огибающей $A(t)$ моменту t_0 окончания преамбулы может быть записано в виде

$$\begin{aligned} \hat{k} = \arg \max_{k+B_{-16}, k+B_{16}} Z(k) \quad & \& (Z(\hat{k}) \geq \beta_{\text{пор}} \cdot Z_u(\hat{k})) \\ & \& (\frac{1}{2} \leq \text{sum}(k, B_{-9}, B_{-8}) / \text{sum}(k, B_{-7}, B_{-6}) \leq 2) \\ & \& (\frac{1}{2} \leq \text{sum}(k, B_{-14}, B_{-13}) / \text{sum}(k, B_{-7}, B_{-6}) \leq 2) \\ & \& (\frac{1}{2} \leq \text{sum}(k, B_{-16}, B_{-15}) / \text{sum}(k, B_{-7}, B_{-6}) \leq 2), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\beta_{\text{пор}} = 1 \dots 4$ – поправочный коэффициент для порога выявления преамбулы, определяемый допустимой вероятностью ложной тревоги.

После выявления совокупности моментов t_0 окончания преамбулы идентификационный номер воздушной цели для каждого из них может быть определён как побитовая сумма

$$Id = \sum_{m=0}^{23} 2^m \quad \& \left(\frac{\text{sum}(\hat{k}, B_{2m}, B_{2m+1})}{\text{sum}(\hat{k}, B_{2m+1}, B_{2m+2})} > 1 \right) \quad (6)$$

Объединенная обработка выборок данных, характеризующихся совпадающими идентификаторами целей, позволяет минимизировать влияние аддитивных шумов на качество оценивания взаимных задержек сигналов и создавать системы радиоконтроля, обеспечивающие высокоточное ОК ИРИ.

Результаты проверки работоспособности адресной обработки сигналов при определении координат воздушных целей

Для оценки корректности изложенного выше подхода использовалась аппаратура компании АО ИРКОС со специализированным программным обеспечением (ПО) оперативного режима, обеспечивающим сбор и адресную обработку данных с соответствии с разностно-дальномерным методом. Рис. 3 показывает, что в полосе частот 1090 ± 4 МГц отображаемый темным цветом текущий спектр, как правило, имеет шумовой характер. Накопленный же спектр демонстрирует фиксацию сравнительно мощных радиоимпульсов, подтверждая, что в диапазоне частот, предназначенном для сигналов управления воздушным движением, радиоизлучения имеют пакетный характер. Выбрав эту полосу частот для разностно-дальномерной обработки, оператор имеет возможность активировать процесс адресного сбора данных с разных ПП на центральный пост системы. При наличии в зоне действия РДС воздушных целей через несколько секунд он сможет увидеть на экране таблицу результатов ОК, подобную показанной на рис. 4. Наличие в таблице двух заполненных строк указывает на то, что ПП системы РДС на интервале измерений зафиксировали преамбулы ADS-B сигналов и сумели осуществить идентификацию 2 воздушных целей.

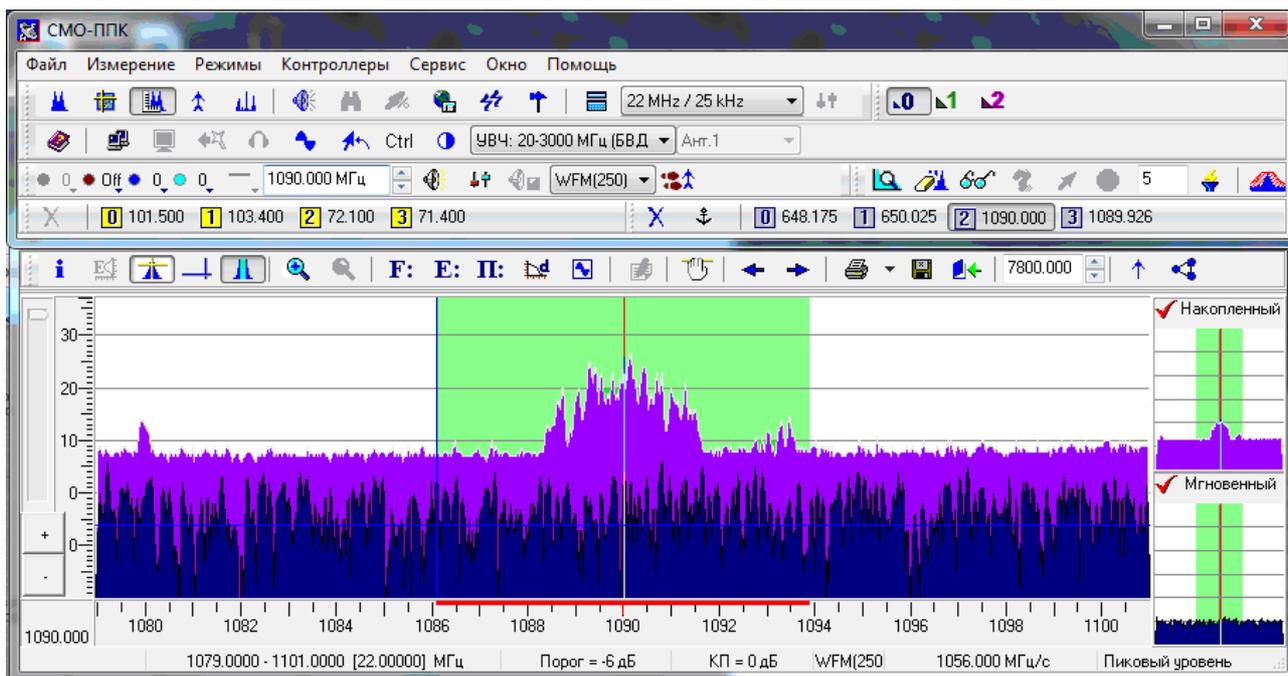


Рис. 3. Установка на обработку полосы частот, предназначенной для сигналов управления воздушным движением

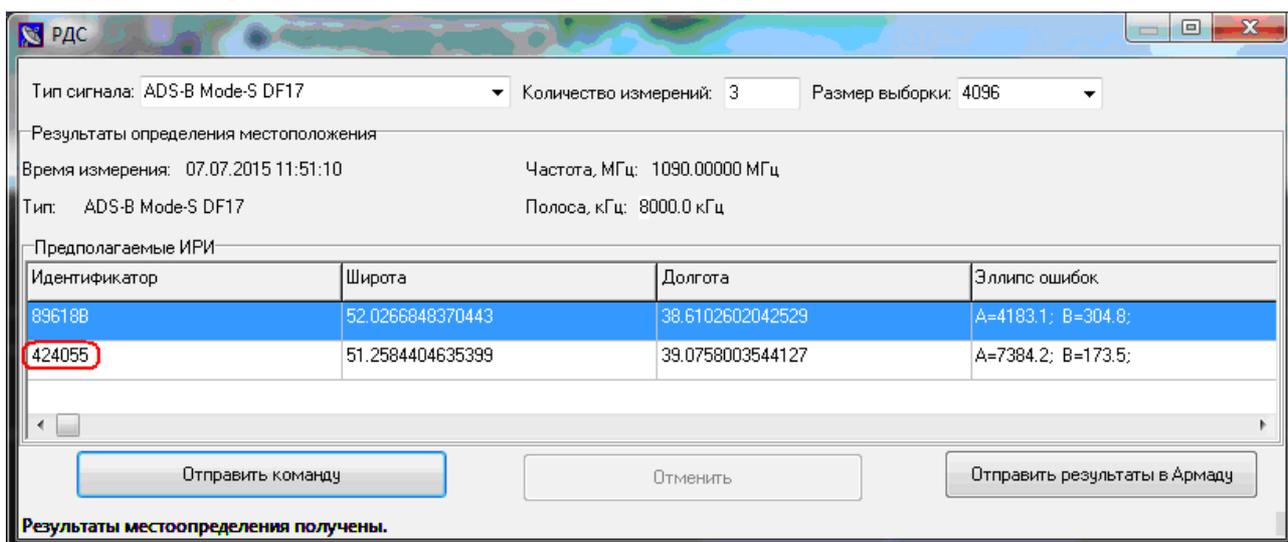


Рис. 4. Результат ОК воздушных целей, пролетающих в 30...50 км от Воронежа

Координаты целей, получаемые в ходе эксперимента, обладали достаточно высокой стабильностью, что являлось косвенным подтверждением правильности сбора данных для разностно-дальномерных расчетов. Для повышения надёжности проверки параллельно с оценкой координат при помощи РДС производился контроль воздушного пространства при помощи *online*-сервисов наблюдения за воздушным движением. Данные, представленные на рис. 5, показывают, что в анализируемый момент времени в окрестности Воронежа действительно пролетал борт «AFL1637» с шестнадцатеричным идентификационным номером «424055». Координаты самолёта, полученные от системы

РДС (рис. 4) и от *online*-сервиса (рис. 5) вполне сопоставимы, хотя и не идентичны; расхождения объясняются погрешностью работы системы РДС, а также задержкой получения данных от *online*-сервиса.

При отображаемой на рис. 5 воздушной обстановке следовало бы ожидать появления в таблице результатов РДС ещё одной цели – самолёта, наблюдаемого немного севернее Воронежа. Однако, диаграммы направленности антенн ПП тестируемой РДС преимущественно были сориентированы в южном направлении, что и объясняет пониженную чувствительность системы к целям, подлетающим к городу с северного направления.

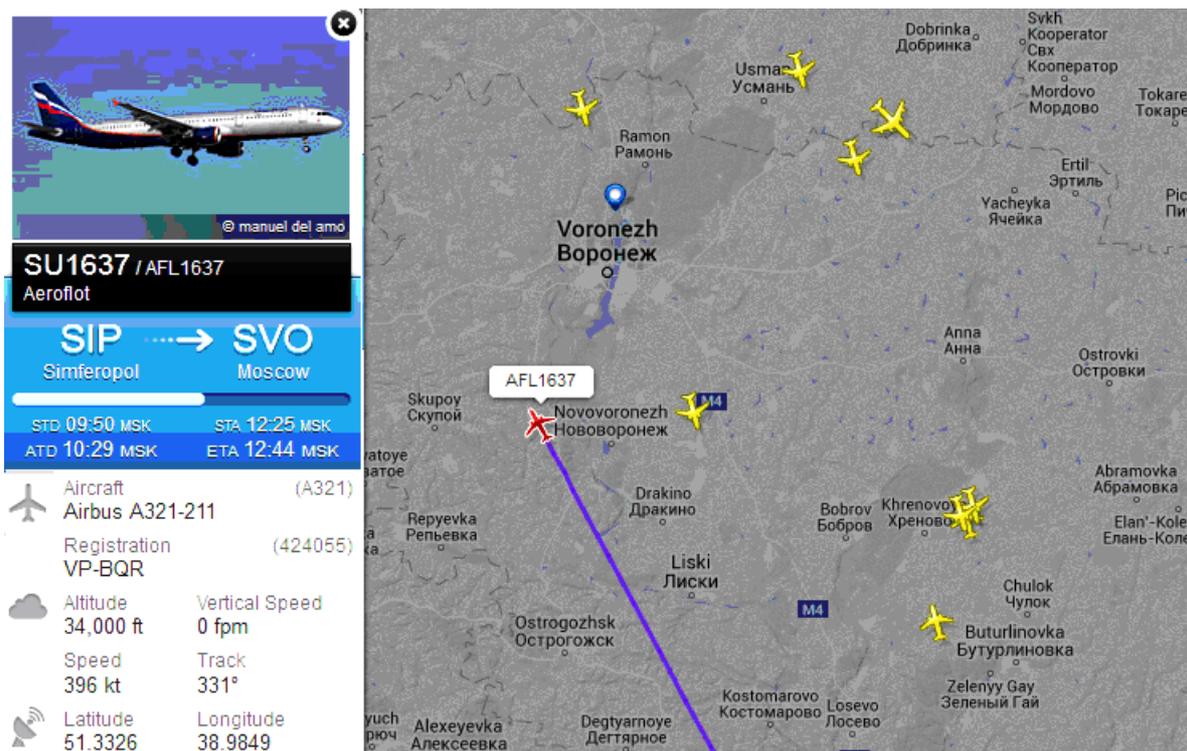


Рис. 5. Проверка корректности ОК сторонними *online*-средствами

Следует учесть также формальную недостаточность трёх ПП для решения трёхмерной задачи ОК. Для преодоления этого противоречия было решено использовать сведения о высоте, получаемые декодированием служебной информации, отсылаемой самим самолётом. Такой подход позволил получить примерно 10%-ю относительную погрешность ОК, т.е. для самолётов, пролетающих в 10-километровой зоне от центра Воронежа погрешность, как правило, не превышала 1 км, а для целей, удаленных на расстояние 30...50 километров, погрешность ОК составляла от 2 до 3 километров. Подобную погрешность, конечно, трудно считать образцовой, однако без увеличения числа ПП в РДС улучшить результат вряд ли возможно. Вместе с тем, корректность адресной обработки сигналов проведенные эксперименты вполне подтвердили, что и являлось их основной целью.

Литература

1. Отчет МСЭ-R SM.2211-1 (06/2014). Сравнение методов определения географического местоположения источника сигнала, основанных на разнице во времени прихода и угле прихода сигнала. – Женева, МСЭ-R, 2015. – 7 с.
2. Калинин, Ю.Е. Синхронизация радиоконтрольных постов разностно-дальномерной системы определения координат источников радиоизлучения / Ю.Е. Калинин, В.А. Козьмин, И.Б. Крыжко, А.В. Поляков, А.А. Саликов, А.Б. Токарев // Радиотехника. – 2014. – № 3. – С. 51–54.
3. Рембовский, А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин; под ред. А.М. Рембовского. - 3-е изд., перераб. и доп. – М: Горячая линия-Телеком, 2012. – 640 с.
4. Козьмин, В.А. Сравнение угломерного и разностно-дальномерного методов местоопределения по критерию охвата территории при радиоконтроле / В.А. Козьмин, А.П. Павлюк, А.Б. Токарев // Электросвязь. – 2014. – № 2. – С. 37-40.
5. История развития ADS-B и основные форматы данных – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://gadss.ru/ads-b-history-adsbradar-ru>

Воронежский государственный технический университет

ADDRESS DATA PROCESSING OF AIR TARGET SIGNALS IN TDOA-SYSTEMS

D.A. Alekseev, S.Yu. Beletskaya, A.B. Tokarev

The collection of data for TDOA-system and other similar systems is often complicated by the fact that in the analyzed frequency bands often works many of similar sources, emitting their signals asynchronously with respect to each other. In the paper an appropriate address data processing algorithm proposed and brief results are shown for the experiment of determine the coordinates of several air targets by TDOA-system with a base of several kilometers

Key words: address data processing, radio monitoring, TDOA-method

**ТЕРМОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ДВУХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЕ
[Cu₂O]₉₀[Cu₂Se]₁₀ – [Cu₂O]₆₀[Cu₂Se]₄₀**

В.В. Бавыкин, Ю.Е. Калинин, Л.В. Канивец, А.С. Шуваев

Исследован термольтваический эффект в двухслойной структуре [Cu₂O]₉₀[Cu₂Se]₁₀-[Cu₂O]₆₀[Cu₂Se]₄₀. Из полученных температурных зависимостей э.д.с. наблюдаемого эффекта определена энергия активации подвижности носителей заряда. Рассчитана и построена температурная зависимость мощности термольтваического эффекта, максимальное значение которой равно P = 0.7 нВт при T=800 К

Ключевые слова: композиты, электрические свойства, термольтваический эффект

Введение

Термольтваический эффект, заключающийся в возникновении спонтанной генерации электрического напряжения образцом материала при его равномерном нагреве, был обнаружен случайно при исследовании высокотемпературных электрических свойств полупроводниковых соединений на основе редкоземельных металлов. По мнению авторов исследований, в основе этого физического явления лежит коллективный процесс изменения валентности ионов редкоземельного металла (самария), сопровождающийся скачкообразным увеличением количества свободных электронов [1-4]. Термольтваический преобразователь на основе генерации электродвижущей силы при нагреве полупроводникового материала на основе сульфида самария в условиях отсутствия внешних градиентов температуры обладает рядом преимуществ (отсутствие необходимости создания градиента температуры, меньший удельный вес и т.д.) [5]. Принципиальнейшее отличие термольтваического эффекта, обнаруженного в сульфиде самария, от классического эффекта Зеебека состоит в том, что преобразование тепловой энергии в электрическую происходит при равномерном нагреве образца, то есть в отсутствие разности температур.

Учитывая вышесказанное, в работе была исследована возможность проявления термольтваического эффекта в двухслойных образцах [Cu₂O]₉₀[Cu₂Se]₁₀ – [Cu₂O]₆₀[Cu₂Se]₄₀, слои которого отличались составом входящих в них фаз.

1. Образцы и методика эксперимента

Образец градиентного материала [Cu₂O]₉₀[Cu₂Se]₁₀-[Cu₂O]₆₀[Cu₂Se]₄₀ изготавливался методом двухстадийного горячего прессования:

- холодное прессование (брикетирование) при комнатной температуре, в воздушной среде при давлении 300 МПа;

Бавыкин Владимир Владимирович - ВГТУ, магистрант, e-mail: threeroad@mail.ru
 Калинин Юрий Егорович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, E-mail: kalinin48@mail.ru
 Канивец Людмила Владимировна - ВГТУ, аспирант, e-mail: l-kanivets@mail.ru
 Шуваев Александр Сергеевич - ВГТУ, аспирант, e-mail: shved36rus@bk.ru

- горячее прессование при T = 800 К, в воздушной среде при давлении 600 МПа, в течение 5 минут.

Шихту композиционного материала нужных составов получали путем прямого смешивания порошков компонентов в планетарной шаровой мельнице при нормальных условиях.

Исходными компонентами служили Cu₂O – чда и Cu₂Se, полученный механосинтезом.

Синтез селенида меди производили в планетарной шаровой мельнице в течение 6 часов в халцедоновых барабанах с халцедоновыми шарами в соотношении шихты к рабочим телам – 1:10. Шихта приготавливалась из медного порошка и «серого» селена. После синтеза проводился рентгенофазный анализ (РФА), результаты которого представлены на рис. 1.

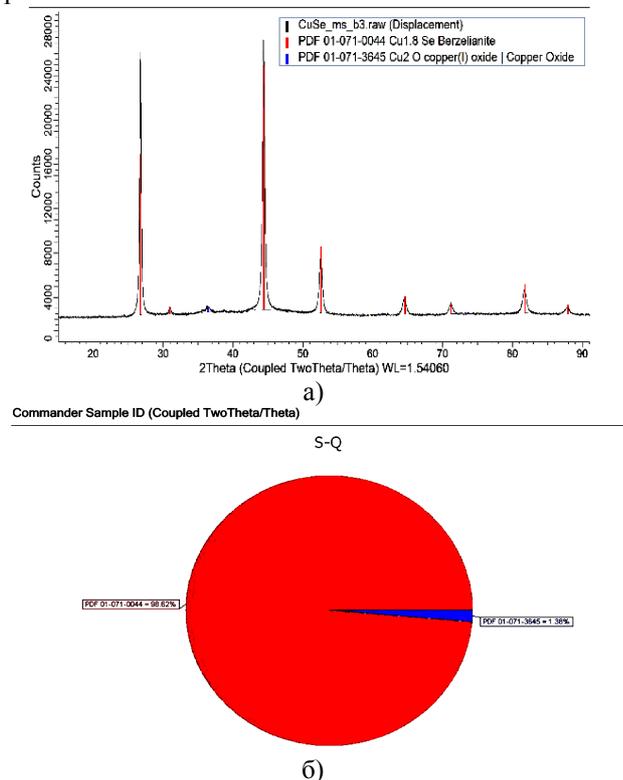


Рис. 1. Рентгенограмма (а) и фазовый состав (б) порошка Cu₂Se, полученного механическим синтезом

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-08-00855).

На представленной рентгенограмме полностью отсутствуют пики исходных компонентов и сторонних соединений кроме Cu_2O , возникновение которого объясняется некоторым содержанием его в исходном сырье.

Термовольтаический эффект в экспериментальном образце исследовался на предварительно спроектированной и изготовленной нами лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2.

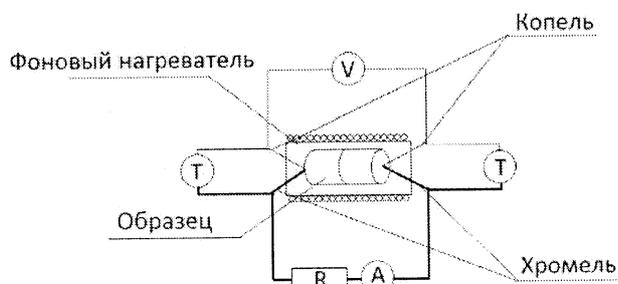


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной установки: V-вольтметр для измерения термовольтаического эффекта; R-сопротивление, равное 1 Ом; А-ампер-метр; T-вольтметры для измерения температуры

Экспериментальный образец зажимался между двумя никелированными медными зондами с зачеканными хромель-копелевыми термопарами, затем помещался внутрь фонового нагревателя. В процессе измерения температурных характеристик контролировался перепад температуры на торцах образца, который не превышал 0.5 К.

В процессе измерения снимались температурные зависимости напряжения и тока термовольтаического эффекта градиентного образца. Для измерения токовой характеристики в цепь было включено нагрузочное сопротивление номиналом близким к собственному сопротивлению исследуемого образца.

Измерения проводились в температурном интервале от 300К до 800К.

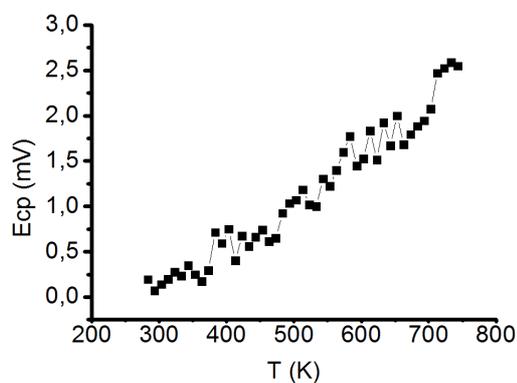
2. Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 3 представлены температурные зависимости э.д.с. (а) и тока (б) термовольтаического эффекта в двухслойном образце $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10}$ – $[\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$. Из рисунка видно, что полученная зависимость имеет монотонно возрастающий характер. Тот факт, что с увеличением температуры напряжение термовольтаического эффекта растет, свидетельствует о термоактивированном характере полученной зависимости, вероятно связанной с ростом подвижности носителей заряда.

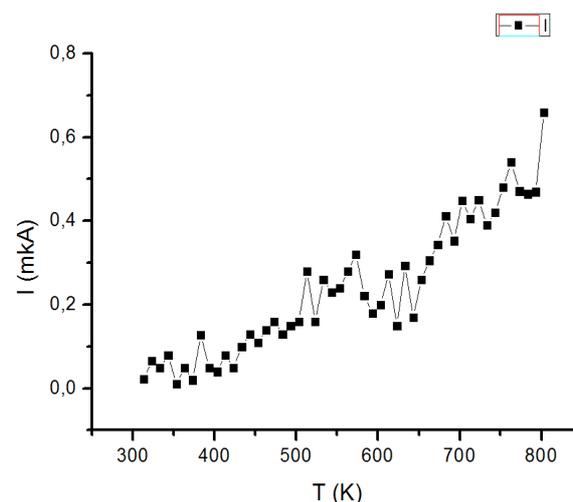
Для определения энергии активации подвижности носителей заряда полученная температурная зависимость э.д.с. термовольтаического эффекта образца была перестроена в логарифмических координатах от обратной температуры (рис. 4). Представленный на рисунке график имеет линейную зависимость. Если полагать, что подвижность носителей заряда описывается уравнением

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (1)$$

где μ_0 – постоянная, ΔE – энергия активации подвижности носителей заряда, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, то по тангенсу угла наклона полученной зависимости можно оценить энергию активации подвижности носителей заряда, которая равна $\Delta E \approx 0.1$ эВ.



а)



б)

Рис. 3. Температурные зависимости э.д.с. (а) и тока (б) термовольтаического эффекта двухслойного образца $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10}$ – $[\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$

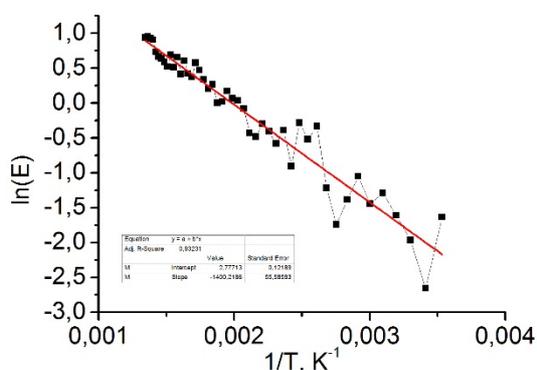


Рис. 4. Зависимость логарифма э.д.с. термовольтаического эффекта двухслойного образца $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10}$ – $[\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$ от обратной температуры

По полученным результатам была рассчитана температурная зависимость мощности термо voltaического эффекта образца (рис. 5).

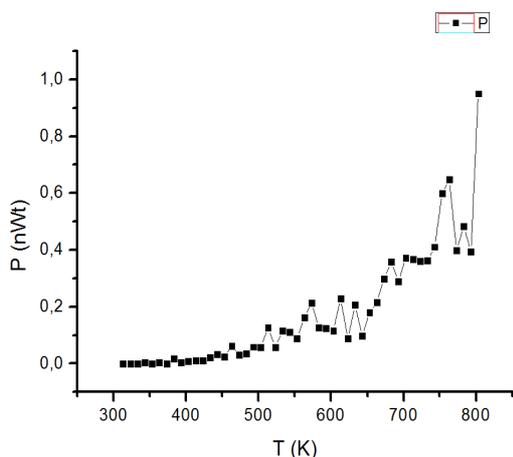
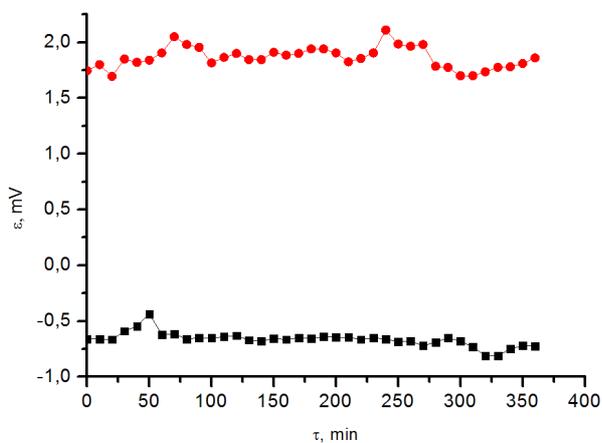


Рис. 5. Температурная зависимость мощности термо voltaического эффекта градиентного образца состава $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10}-[\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$

Из рисунка видно, что мощность также имеет монотонно возрастающую зависимость от температуры от 0 и до $\sim 0,7$ нВт при 800 К.

Для исследования временной зависимости термо voltaического эффекта синтезированные образцы подвергались временным испытаниям, которые проводились в воздушной среде при температуре $T = 628$ К в течение 6 часов, показания при этом записывались через каждые 10 минут. Результаты представлены на рисунке 6. Из рис. 6 видно, что э.д.с. термо voltaического эффекта практически не меняется со временем. Данный результат свидетельствует о том, что наблюдаемый нами эффект в синтезированных композитах не является фактом релаксационных явлений, возникаемых в образце, а связан с различной концентрацией носителей заряда при высоких температурах.



а – прямая ориентация;
б – обратная ориентация;

Рис. 6. Временная зависимость э.д.с. термо voltaического эффекта

Таким образом, наряду с изучением основных закономерностей проявления термо voltaического эффекта в градиентных полупроводниках на основе сульфида самария, необходим поиск и других градиентных полупроводников на основе более дешевых компонентов, как показано на примере двухслойных образцов $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10}-[\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$. Поиск таких систем позволит расширить температурный интервал проявления термо voltaического эффекта и создать предпосылки к разработке более эффективных термоэлектрических преобразователей. Однако, существующие оценки эффективности тепловых преобразователей на основе термо voltaического эффекта показывают, что они уступают преобразователям на основе эффекта Зеебека. Так на данный момент лабораторные образцы генераторов на основе SmS имеют мощности порядка 5 мВт (лучшее образцы — 10 мВт) с квадратного сантиметра, а генерируемое напряжение составляет около 50 мВ [6]. Тем не менее, учитывая преимущество отсутствия градиента температуры, разрабатываемые генераторы на основе термо voltaического эффекта имеют большое будущее. А если подобрать градиентные полупроводники с рабочей температурой вблизи комнатной, то такие источники могут работать за счет тепловой энергии окружающей среды.

Большие перспективы могут также иметь гибридные генераторы, работающие как на эффекте Зеебека, так и на основе термо voltaического эффекта. В этом случае можно увеличить КПД преобразования тепловой энергии в электрическую по сравнению с КПД термоэлектрических генераторов на основе эффекта Зеебека. Дальнейшие исследования и разработки в этом направлении должны подтвердить вышесказанное.

Заключение

Методом двухстадийного горячего прессования синтезированы двухслойные образцы $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10}-[\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$, в которых исследованы температурные зависимости э.д.с. и тока термо voltaического эффекта. Установлено, что исследованные зависимости монотонно возрастают от комнатной температуры до $T \sim 800$ К, что связывается с ростом подвижности носителей заряда.

Показано, что температурная зависимость термо voltaического эффекта в исследуемой системе описывается законом Аррениуса с энергией активации 0,1 эВ.

Рассчитана температурная зависимость мощности термо voltaического эффекта, максимальное значение которой равно $P = 0,7$ нВт при $T = 800$ К.

Литература

1. Каминский В.В., Казанин В.В. Термовольтаический эффект в тонкопленочных структурах на основе сульфида самария / В.В. Каминский, М.М. Казанин // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 8. – С. 92 – 94.
2. Каминский В.В. Соловьёв С.М. Возникновение электродвижущей силы при изменении валентности ионов самария в процессе фазового перехода в монокристаллах SmS // ФТТ. 2011. Т. 43. Вып. 3. С. 423–426.
3. Каминский В.В., Казанин М.М., Соловьёв С.М., Голубков А.В. Термовольтаический эффект в гетероструктурах на основе сульфида самария с составом $\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ // ЖТФ, 2012, том 82, вып. 6, с.142-144.
4. Егоров В.М., Каминский В.В. Эндотермический эффект при нагревании полупроводникового сульфида самария / В.М. Егоров, В.В. Каминский // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – Вып. 8. – С. 1521 – 1522.
5. Каминский В.В., Голубков А.В., Казанин М.М., Павлов И.В., Соловьёв С.М., Шаренкова Н.В. Термоэлектрический генератор (варианты) и способы изготовления термоэлектрического генератора // Патент № 2303834 от 27 июля 2007 г.
6. Грушев И., Полухин И. Сульфид самария и новейшие разработки на его основе // Компоненты и технологии, - 2014. - № 8. - С. 126-133.

Воронежский государственный технический университет

TERMOVOLTAIC EFFECT IN TWO-LAYER STRUCTURE $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10}-[\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$

V.V. Bavykin, Yu.E. Kalinin, L.V. Kanivets, A.S. Shuvaev

Investigated the effect of termovoltaiс in a two-layer structure $[\text{Cu}_2\text{O}]_{90}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{10}-[\text{Cu}_2\text{O}]_{60}[\text{Cu}_2\text{Se}]_{40}$. From the temperature dependence of the power termovoltaiс effect observed activation energy of the charge carrier mobility. Designed and built by the temperature dependence of power termovoltaiс effect, the maximum value of which is equal to $P = 0.7 \text{ nW}$ at $T = 800 \text{ K}$

Key words: composites, electrical properties, termovoltaiс effect

ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ШИРОКОЗОННЫХ ОКСИДОВ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК

И.В. Бабкина, О.В. Жилова, К.Г. Королев, В.А. Макагонов, П.М. Хлоповских

Получены пленки ZnO, In₂O₃ и многослойная структура (In₂O₃/ZnO)₈₃. Исследованы структура и электрические свойства пленок. Рентгенографические исследования показали, что пленки ZnO и In₂O₃ имеют мелкокристаллическую структуру. Низкотемпературные измерения сопротивления позволили выявить наличие слабой локализации электронов проводимости для пленок In₂O₃ и (In₂O₃/ZnO)₈₃. Обнаружено, что при увеличении температуры отжига в пленках In₂O₃ длина неупругого рассеивания электронов увеличивается, а в пленках (In₂O₃/ZnO)₈₃ – уменьшается

Ключевые слова: широкозонный полупроводник, электрические и магниторезистивные свойства, многослойная гетерогенная структура, слабая локализация электронов

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время всесторонне исследованы широкозонные полупроводники на основе оксидов олова, цинка, титана, вольфрама, индия и иридия, применяемые как материалы для резистивных газовых датчиков. Механизм газовой чувствительности оксидных материалов основан на представлении о поверхностных состояниях. Используемые в газовых сенсорах полупроводниковые оксиды представляют собой мелкозернистые материалы с размером зерен 10 – 100 нм.

С уменьшением размера кристаллитов в сенсорном материале увеличивается доля поверхностных атомов, а, следовательно, эффективная адсорбирующая поверхность. Адсорбированные на поверхности кристаллита молекулы газа могут либо отдавать электроны (доноры), либо присоединять к себе электроны из оксида (акцепторы). Электрическая проводимость такой системы определяется электронными свойствами объема кристаллита и переносом заряда через межкристаллитные прослойки. При этом выделяют два механизма электропроводности нанокристаллического материала [1]. Это механизм поверхностных ловушек, при котором межкристаллитные барьеры малы, а электрическая проводимость определяется концентрацией носителей заряда в обедненном слое, и механизм барьерной проводимости, при котором концентрация носителей принимается постоянной, а их подвижность изменяется.

Выяснено, что атомы кислорода, азота и простейшие свободные радикалы (CH₂, CH₃, OH, NH₂ и другие) при адсорбции на поверхности оксидов и оксидов металлов (ZnO, TiO₂, CdO, NiO, SnO₂

и другие) действуют как акцепторы, а атомы водорода и металлов – как доноры электронов. Поэтому первые уменьшают проводимость (концентрацию электронов и их подвижность), а вторые – увеличивают. Таким образом, наиболее перспективные материалы для датчиков водорода должны иметь наногранулированную структуру стабильную при рабочей температуре датчика. Если мы понижаем размер кристаллитов оксида до нескольких нанометров и стабилизируем такое размерное состояние полупроводниковых гранул дополнительной фазой, то приходим к наноккомпозитам. Электронная структура таких гетерогенных систем в настоящее время изучена в недостаточной степени. Новые гетерогенные среды полупроводник-полупроводник с эффективными толщинами слоев порядка единиц нанометров интересны как с точки зрения механизмов электропереноса, так и в плане практического применения.

Наличие электропереноса по оборванным связям в интерфейсе дает возможность прогнозировать значительную зависимость электрического сопротивления от процессов хемосорбции активных газов в межслоном пространстве. Толщины слоев многослойной структуры должно существенно подавить процессы рекристаллизации при повышенных температурах, что стабилизирует электрические параметры пленки при рабочих температурах газовых датчиков.

В связи с этим, представленные в работе исследования структуры и электрических свойств пленок ZnO, In₂O₃ и многослойной системы (In₂O₃/ZnO)₈₃ являются актуальными.

Образцы и методика эксперимента

Получение образцов осуществлялось методом ионно-лучевого распыления [2,3].

Для формирования многослойной структуры (In₂O₃/ZnO)₈₃ было использовано одновременное распыление двух мишеней. Мишени представляли собой керамические пластины составов In₂O₃ и ZnO, закрепленные на медном водоохлаждаемом основа-

Бабкина Ирина Владиславовна – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: ivbabkina@mail.ru
 Жилова Ольга Владимировна – ВГТУ, аспирант, e-mail: zhilova105@mail.ru
 Королев Константин Геннадьевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: korolev.kg@mail.ru
 Макагонов Владимир Анатольевич – ВГТУ, инженер, e-mail: vlad_makagonov@mail.ru
 Хлоповских Павел Михайлович – ВГТУ, магистр, e-mail: hlopovskih18@mail.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-02-97512-р_центр_a

нии планарным размером 280x80 мм². Напыление производилось на вращающуюся подложку. Изменяя скорость вращения и параметры распыления, регулировались толщины осаждаемых слоев. Для получения градиента толщин на подложках, в ходе одного технологического процесса между мишенью и подложкодержателем устанавливался V-образный экран. Количество оборотов карусели задавало количество бислоев в полупроводниковой пленке.

При формировании пленок In₂O₃ и ZnO использовалась технология и режимы, описанные выше, но проводилось распыление одной мишени соответствующего состава. Количество полученных слоев, а также толщины пленок рассчитаны по методике [4] и представлены в таблице.

Со- став	Кол- во слоев	Толщина слоя 1, нм	Толщина слоя 2, нм	Толщина пленки, мкм
In ₂ O ₃	71	0,43-1,75	-	0,03-0,12
ZnO	69	0,63-1,68	-	0,04-0,12
In ₂ O ₃ / ZnO	83	0,43-1,68	0,57-1,56	0,05-0,28

Результаты эксперимента и их обсуждение Структура и фазовый состав

Синтезированные пленки ZnO, In₂O₃ и (In₂O₃/ZnO)₈₃ были исследованы методом рентгеновской дифракции на установке Bruker «D2 Phaser». Использовалась медная рентгеновская трубка с характеристическим излучением λ_{Kα} = 1.5406 Å.

На рисунках 1-2 представлены угловые зависимости рентгеновской дифракции для исследуемых пленок. Анализ приведенных данных показывает, что все пленки имеют кристаллическую мелкодисперсную фазу. Средний размер областей когерентного рассеивания (в данном случае отнесенный к размеру кристаллитов), оцененных по уравнению Дебая-Шеррера, для ZnO и In₂O₃ составил 14 нм и 20 нм соответственно.

Оксид цинка относится к классу соединений группы A₂B₆ с гексагональной сингонией, решеткой типа вюрцита, пространственной группы P63mc. Параметры решетки ZnO зависят от концентрации свободных электронов, которая действует через потенциал деформации минимума зоны проводимости, занятого этими электронами, концентрации атомов примеси, дефектов и разницы их ионных радиусов относительно замещенного иона матрицы, внешних деформаций (например, наведенных подложкой), температуры [5, 6]. В справочной литературе обычно приводятся данные: a = 0,32495 нм с = 0,52069 нм и z = 2 нм [7].

Дифракционные зависимости для пленки ZnO, представленные на рис. 1, выявили гексагональную кристаллическую структуру.

Оксид индия имеет кубическую сингонию, пространственная группа Ia3̄, параметры ячейки a = 1,01194 нм и z = 16 нм [8]. Рентгеновская дифракция In₂O₃ (рис. 2) выявила мелкокристаллическую кубическую структуру полученной пленки. В отличие от пленок ZnO в данном случае проявилось большое число отражающих плоскостей кристаллитов In₂O₃.

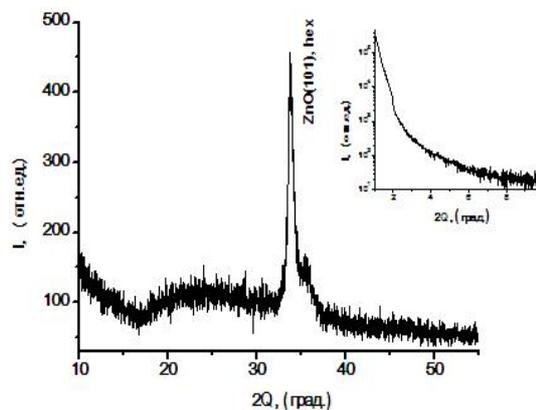


Рис. 1. Рентгеновская дифракция пленок: ZnO

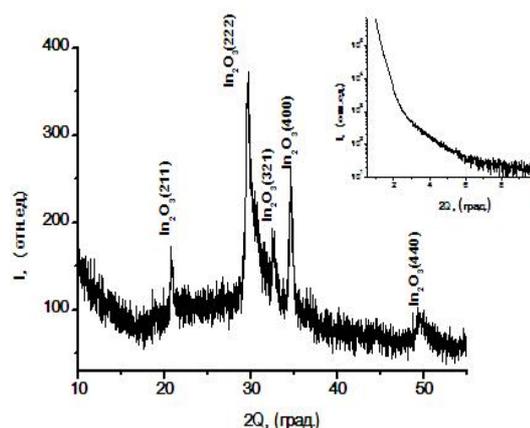


Рис. 2. Рентгеновская дифракция пленок: In₂O₃

Анализ рентгеновской дифракции многослойной пленочной структуры (In₂O₃/ZnO)₈₃ выявил наличие широкого максимума 2θ ~ 32,3° (рис.3). Это может быть гало от одной из аморфных фаз многослойной структуры или сумма двух (или большего числа) интерференционных максимумов от мелкокристаллических структур In₂O₃ и ZnO. Первое предположение подтверждается наличием только одного максимума и наличием второго гало проявившегося как плечо максимума со стороны меньших углов на фоне основного. Если исследовать корректность второго предположения, то пик хорошо аппроксимируется двумя интерференционными максимумами In₂O₃(222) и ZnO(111).

Проведенное моделирование данного предположения в программе «Торас 4.2» позволило по уравнению Дебая-Шеррера оценить размеры кристаллитов. Они составили 4,7 нм и 4,2 нм для ZnO и In₂O₃. Если учесть толщины бислоев в многослойной структуре (порядка нескольких нанометров), то полученные значения вполне корректны.

Рентгеновская дифракция на малых углах сканирования для пленок ZnO и In_2O_3 особенностей зависимостей не выявила (вставки рис.1-2). Однако в многослойной структуре $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ малоугловая дифракция показала наличие максимумов на дифрактограмме (вставка рис. 3).

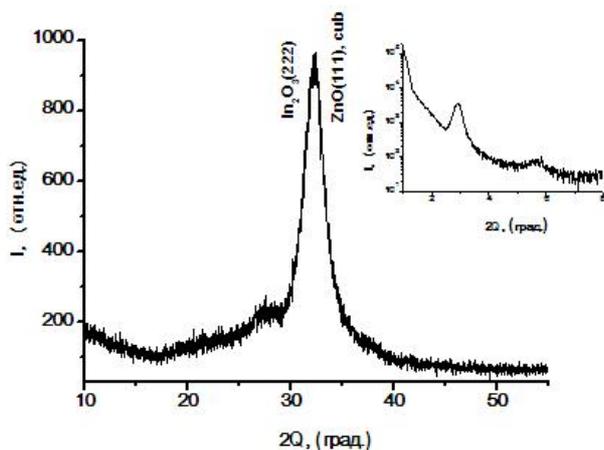


Рис. 3. Рентгеновская дифракция многослойной пленочной структуры $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$

Сопоставление толщин бислоев, проведенное из интерференционных измерений на МИИ-4, и межплоскостных расстояний (d) дифракционных измерений выявило хорошее совпадение. Следовательно, наблюдаемые максимумы на малоугловых рентгенограммах сформированы отражением рентгеновских волн на границе раздела многослойной пленки.

Электрические свойства

Влияние поверхности тонкой пленки на процессы электропереноса можно оценить по зависимостям удельного электрического сопротивления (ρ) от толщины. На рис. 4 показаны зависимости ρ от толщины пленки (h) для оксидов цинка и индия (кривые 1 и 2 соответственно). Видно, что с уменьшением толщины пленки влияние поверхностных состояний возрастает, что приводит к росту удельного электрического сопротивления.

Влияние интерфейса $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ в многослойных пленках $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ приводит к существенному уменьшению значений удельного электрического сопротивления в диапазоне толщин пленки 0,45-0,65 мкм относительно ρ однослойных пленок. Можно рассчитать, что при таких толщинах эффективная толщина бислоев составляет 5,4- 7,8 нм.

Такую необычную зависимость невозможно объяснить из суперпозиции удельных электрических сопротивлений слоев оксидов индия и цинка. Можно предположить несколько причин такого вида зависимостей: либо необходимо рассматривать вклад в процесс электропереноса состояний на границе раздела $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$, либо толщина слоев влияет на структуру полупроводника вследствие значительных деформаций кристаллической решетки.

Последнее предположение можно косвенно подтвердить наличием размытого дифракционного максимума на дифрактограмме пленки $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$, который ранее аппроксимировался двумя интерференционными максимумами In_2O_3 (222) и ZnO (111), и предположить взаимную «подстройку» параметров кристаллической решетки в тонких полупроводниковых слоях.

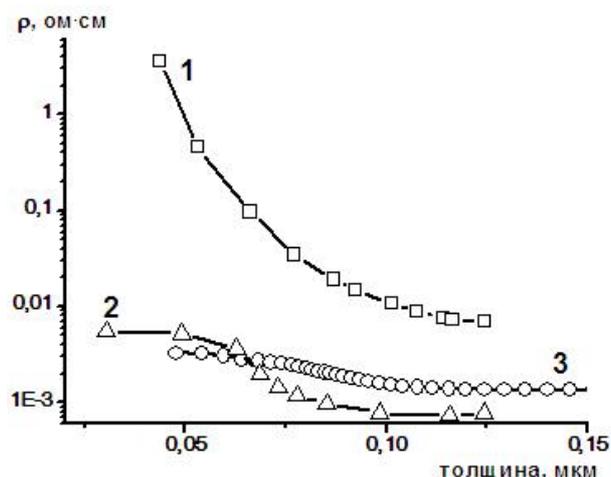


Рис. 4. Зависимости удельного электрического сопротивления от толщины пленок: 1 – ZnO; 2 - In_2O_3 ; 3 - $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$

Влияние термообработки на электрические свойства пленок $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$

Выявленная особенность зависимости $\rho(h)$ для пленок $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ должна проявиться в изменении удельного электрического сопротивления после температурной обработки многослойных полупроводниковых пленок. Отжиг может привести к перестройке структуры межфазной границы.

Этот процесс приведет к плавному изменению сопротивления во всем диапазоне толщин пропорционально объемной доли межфазного слоя. Термообработка может повлиять на изменение структуры и фазового состава каждого слоя в сторону равновесного состояния. Можно предположить, что при достаточно высоких температурах взаимная диффузия может привести к размытию области межфазной границы и увеличению размера кристаллитов. Такой процесс приведет к росту сопротивления во всем диапазоне толщин.

Приведенные выше модельные представления перестройки многослойной полупроводниковой пленки при термической обработке позволяют сделать некоторые выводы из приведенных на рис. 5 зависимостей $\rho(h)$.

Обнаружено, что в температурном диапазоне от 573 до 773 К увеличение сопротивления многослойной пленки наблюдается только в диапазоне толщин 0,04- 0,1 мкм.

В более толстых образцах отмечено уменьшение ρ при такой термической обработке. Это можно объяснить из ранее высказанного предположения о

релаксации неравновесной структуры пленки с маленькой толщиной слоев к равновесной.

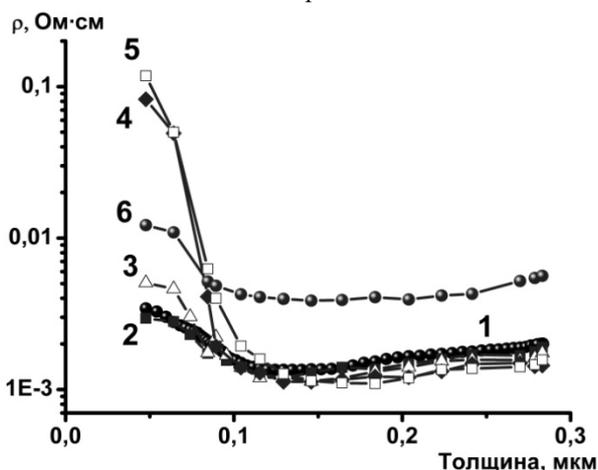


Рис. 5. Зависимости удельного электрического сопротивления многослойной структуры $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ от толщины бислоев для различных температур термообработки: 1-исходный; 2- 473 К; 3- 573 К ;4- 673 К 5- 773 К; 6- 873 К

При температуре отжига 873 К возрастание удельного электрического сопротивления наблюдается в пленках толщиной больше 0,1 мкм и падение значения ρ при толщинах меньше 0,1 мкм. Необходимо заметить, что относительно исходных значений произошло равномерное повышение $\rho(h)$. Такие изменения, скорее всего, связаны с диффузионными процессами, которые приводят к размытию области межфазной границе и увеличению размера кристаллитов, это приведет к увеличению сопротивления пленок.

Низкотемпературные зависимости электрического сопротивления

Для выявления влияния толщины пленки (слоев) и структуры образцов на механизмы электропереноса были исследованы температурные зависимости электрического сопротивления пленок в диапазоне температур 77-293 К. Анализ полученных зависимостей $R(T)$ показал, что в исходном состоянии величина удельного сопротивления пленки оксида цинка зависит от толщины образца (рис. 6,7). В случае, когда толщина ZnO составляет 0,066 мкм и $\rho \approx 0,1$ Ом·см, температурные зависимости электрического сопротивления можно аппроксимировать следующим образом: в диапазоне от 200 до 300 К реализуется термоактивационная проводимость с энергией активации $(E_a) \sim 0,023$ эВ (линейная зависимость электросопротивления в координатах $\ln R$ от $1/T$) (рис. 6 б); в интервале 77-125 К выполняется закон Мотта - $\ln R \sim 1/T^{1/4}$ (рис. 6 в и ур.1). Согласно выражению 2 при радиусе локализации ~ 3 нм оцененная плотность состояний на уровне Ферми $(g(E_F))$, оказалась равной $7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot \text{эВ}$.

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(-\left(\frac{T_0}{T}\right)^n\right) \quad (1)$$

Показатель степени n для трёхмерного пространства и постоянной плотности состояний на уровне Ферми $g(E_F) \approx \text{const}$ оказывается равным $1/4$, а параметр T_0 определяется выражением:

$$T_0 = 17,6 / (g(E_F) a^3 k_B) \quad (2)$$

где a - радиус локализации волновой функции.

Расчеты параметров E_a и $g(E_F)$ для пленки оксида цинка толщиной 0,125 мкм и $\rho(h)$ при комнатной температуре 0,008 Ом·см (рис.4 кривая 2) исходя из зависимости $R(T)$ (рис.7) дает неудовлетворительный результат ($E_a = 0,002$ и $0,009$ эВ $g(E_F) = 1,8 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3} \cdot \text{эВ}$). С другой стороны, достаточно хорошая линейная зависимость наблюдается в координатах $R - \ln T$ в области температур от 77 до 150 К (рис.7 г). Такая зависимость возможна при реализации эффекта слабой локализации электронов проводимости в двухмерном случае.

Основным условием возникновения слабой локализации является условие значительной длины неупругого рассеивания электронов относительно расстояния между упругими столкновениями носителя заряда [9].

Согласно выражениям 3 и 4 изменение проводимости $(\Delta\sigma)$ при реализации эффекта слабой локализации, переходя от трехмерного к двухмерному случаю пропорционально $\ln L_{\varphi}$:

$$d = 3 \Delta\sigma_3 \approx -\text{const} + \frac{e^2}{h} L_{\varphi}^{-1}; \quad (3)$$

$$d = 2 \Delta\sigma_2 \approx -\frac{e^2}{h} \ln \frac{\tau_{\varphi}}{\tau} \approx -2 \frac{e^2}{h} \ln \frac{L_{\varphi}}{l}, \quad (4)$$

где τ_{φ} и τ - времена релаксации для упругого и неупругого рассеяния электронов, l - длина свободного пробега электрона, L_{φ} - длины неупругого взаимодействия электрона.

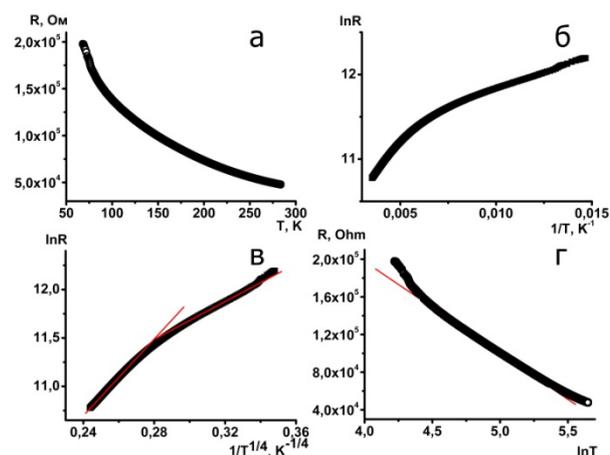


Рис. 6. Температурные зависимости сопротивления пленок ZnO толщиной 0,066 мкм

Так как, величины τ_{φ} и L_{φ} являются степенными функциями температуры: $L_{\varphi} \sim T^S$, на пленках квантовая поправка всегда проявляется в виде специфической зависимости $\Delta R \sim \ln T$. Критерием пере-

хода от трехмерного к двумерному рассмотрению эффекта является условие $\hbar \ll L_{\phi}$. Следовательно, перегиб на зависимости $R(T)$ наблюдается при условии $\hbar \approx L_{\phi}$.

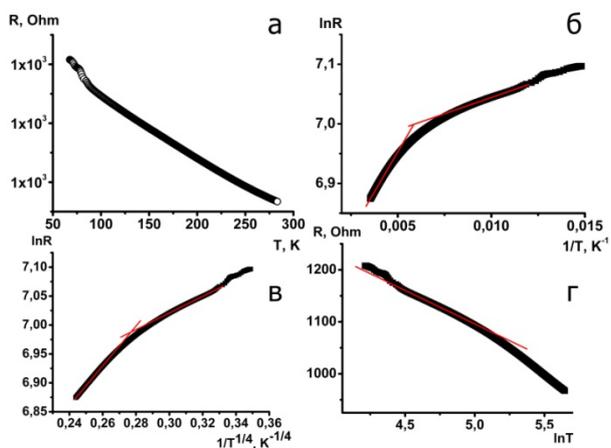


Рис. 7. Температурные зависимости сопротивления пленок ZnO толщиной 0,125 мкм

При приложении магнитного поля слабая локализация электронов проводимости снимается. Следовательно, при измерениях $R(H)$ наблюдается отрицательный магниторезистивный эффект, что является еще одним критерием наличия электронов проводимости в состояниях слабой локализации. Измерение $\rho(H)$ (рис. 8) показало, что в пленке ZnO толщиной 0,125 мкм в исходном состоянии при температуре 77 К относительного изменения электрического сопротивления в магнитном поле не наблюдается с точностью 0,004 %.

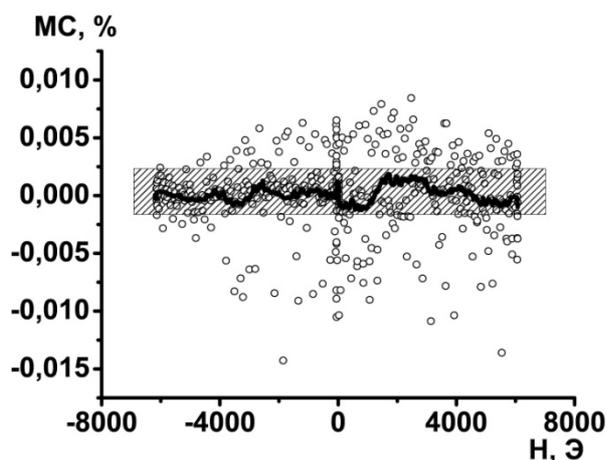


Рис. 8. Полевые зависимости относительного изменения сопротивления пленок ZnO для образца толщиной 0,125 мкм в исходном состоянии при температуре 77 К

Исходя из представленных данных, можно сделать заключение, что в рассмотренном случае реализуется температурная зависимость вырожденного полупроводника без наличия квантовой поправки к проводимости.

После термической обработки пленки ZnO толщиной 0,125 мкм при температуре 748 К в те-

чение 30 минут электрическое сопротивление повысилось более чем на три порядка. В этом случае температурные зависимости $R(T)$ можно объяснить исходя из представлений термоактивированной проводимости в диапазоне температур от 200 до 300 К с энергией активации $\sim 0,15$ эВ и прыжковым механизмом проводимости в интервале температур 77-125 К. Исходя из выражения 2 при $a=3$ нм, плотность состояний на уровне Ферми оценивается величиной $\sim 5,3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \cdot \text{эВ}$.

Были измерены температурные зависимости сопротивления пленок In_2O_3 толщинами 0,05 и 0,11 мкм в исходном состоянии и после термической обработки 748 и 873 К в течение 30 минут.

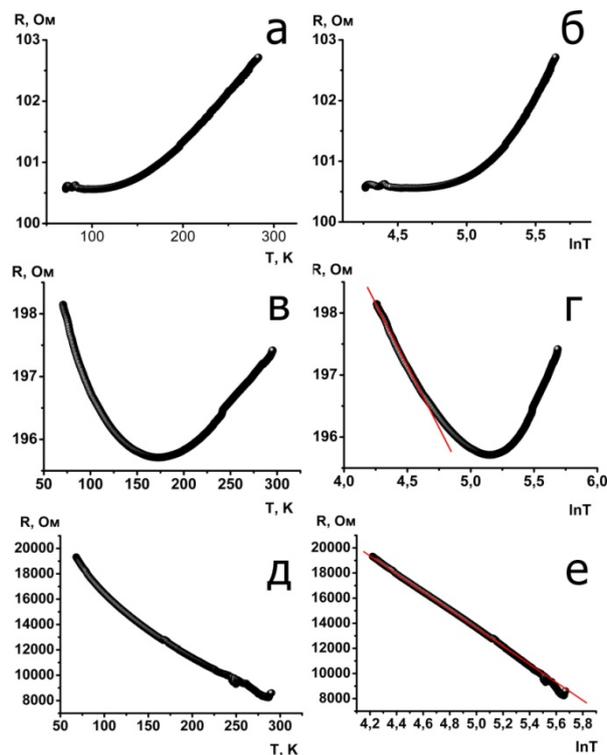


Рис. 9. Температурные зависимости сопротивления пленок In_2O_3 толщиной 0,11 мкм а, б – в исходном состоянии; в, г - после термообработки 748 К в течение 30 мин.; д, е - после термообработки 873 К в течение 30 мин

Все исследуемые образцы имели низкое удельное сопротивление, как в исходном состоянии, так и после отжига ($\sim 8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$). В качестве примера на рис. 8 представлены зависимости $R(T)$ пленок In_2O_3 толщиной 0,05 мкм в исходном состоянии и после термических обработок.

Анализ кривых $R(T)$ показал, что линейная зависимость этой функции наблюдается в координатах $R-\ln T$ (рис. 9 б, г, е). Кроме того, измерение $\rho(H)$ показало, что в пленке In_2O_3 толщиной 0,05 мкм после отжига 748 К в течение 30 минут при температуре 77 К наблюдается магниторезистивный эффект порядка 0,03 % в магнитном поле 6 кЭ (рис.10). Следовательно, можно предположить, что повышение сопротивления пленок In_2O_3 с понижением температуры связано с процессами мягкой

локализации электронов в сильно неупорядоченных средах.

Кроме того из равенства толщины пленки и длины неупругого взаимодействия электрона необходимого для перехода процесса локализации в двухмерный случай и реализации зависимости $\rho \sim \ln T$, было выявлено, что при увеличении температуры отжига длина неупругого рассеивания электронов в пленках In_2O_3 возрастает (рис. а, в, д).

Температурные зависимости сопротивления многослойных пленок $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ с толщинами 0,08 и 0,28 мкм в исходном состоянии и после термической обработки 748 и 873 К в течение 30 минут имели низкое удельное сопротивление в исходном состоянии $\sim 10^{-3}$ Ом·см, и после термической обработки увеличение R было не более чем на порядок величины.

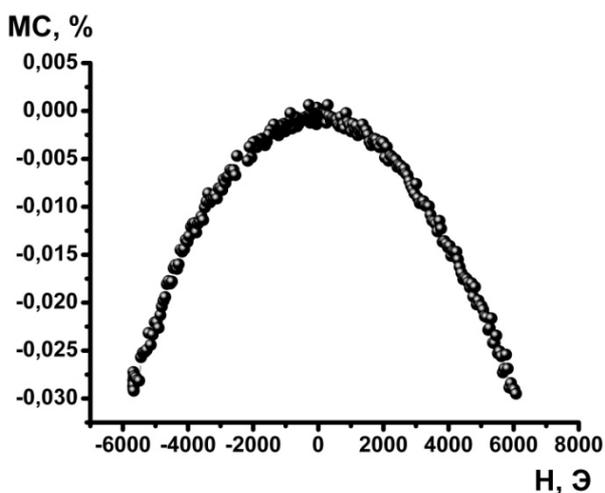


Рис. 10. Полевые зависимости относительного изменения электрического сопротивления пленок In_2O_3 при температуре 77 К для образца $h = 0,05$ мкм после отжига при $T = 748$ К в течение 30 минут

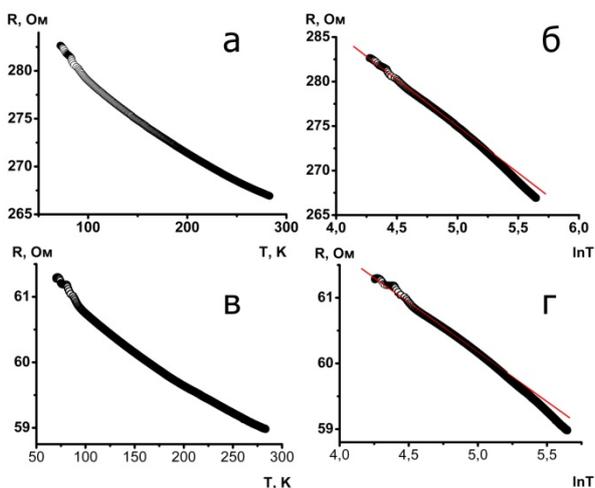


Рис. 11. Температурные зависимости электрического сопротивления пленок $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ в исходном состоянии а - 0,08 мкм, б - 0,28 мкм

Анализ кривых $R(T)$ показал, что полученные данные хорошо описываются зависимостью $R \sim \ln T$ в области низких температур (рис. 11 б, г).

Действительно, измерения $R(H)$ показали, что в пленках $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ толщиной 0,08 и 0,28 мкм в исходном состоянии при температуре 77 К наблюдается магниторезистивный эффект порядка 0,02 % и 0,04 % в магнитном поле 8 кЭ, соответственно (рис. 12).

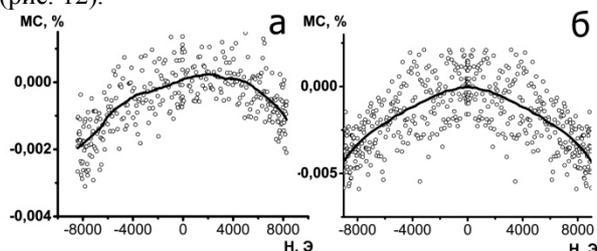


Рис. 12. Полевые зависимости относительного изменения сопротивления пленок $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ в исходном состоянии при температуре 78 К а - 0,08 мкм, б - 0,28 мкм

Анализ длины неупругого рассеивания в пленках $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ толщиной 0,28 мкм показал, что при увеличении температуры отжига длина неупругого рассеивания уменьшается (рис. 13 а, в, г).

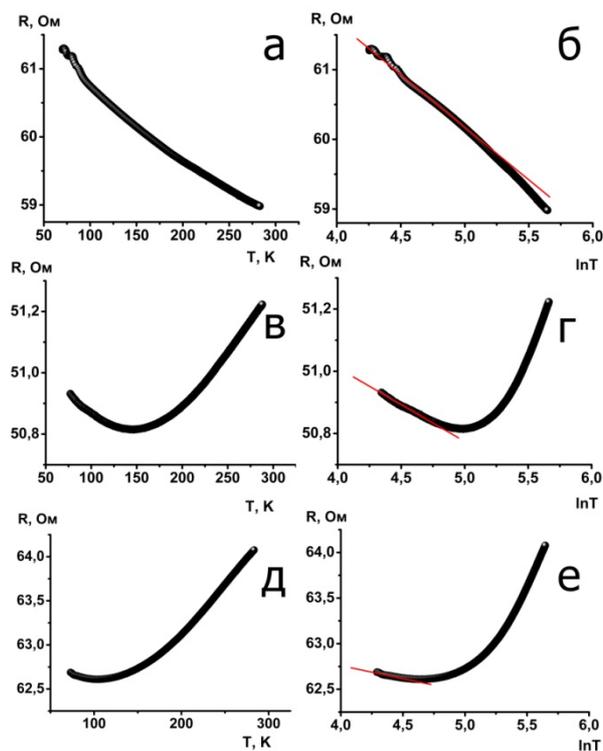


Рис. 13. Температурные зависимости сопротивления пленок $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ толщиной 0,28 мкм а, б – в исходном состоянии; в, г - после термообработки 748 К в течение 30 мин.; д, е - после термообработки 873 К в течение 30 мин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгенографические исследования синтезированных структур показали, что пленки ZnO и In_2O_3

имеют мелкокристаллическую структуру с размером кристаллитов 14 нм и 20 нм, соответственно.

Рентгеновская дифракция пленки $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ выявила один интерференционный максимум, который хорошо описывается суперпозицией пиков $\text{In}_2\text{O}_3(222)$ и $\text{ZnO}(111)$ и оценка размеров кристаллитов полупроводниковых слоев дает величины 4,7 нм для кристаллов ZnO и 4,2 нм для In_2O_3 .

Рентгеновская дифракция на малых углах сканирования $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ показала наличие максимумов от многослойной структуры пленки. Толщины бислоев, рассчитанные исходя из измерений на интерференционном микроскопе МИИ-4 и межплоскостных расстояний d дифракционных измерений, выявили хорошее совпадение.

Обнаружено, что величина удельного электрического сопротивления для пленки $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ $0,45 < h < 0,65$ мкм существенно меньше, чем ρ пленок ZnO и In_2O_3 той же толщины.

Отжиги многослойной пленочной структуры $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ показали, что изменения электросопротивления зависят как от температуры и времени термической обработки, так и от толщины пленки. При температурах отжига от 573 до 773 К увеличение электросопротивления многослойной пленки наблюдается только в диапазоне толщин 0,04-0,1 мкм. В более толстых образцах отмечено уменьшение ρ при такой термической обработке.

Для пленок In_2O_3 и $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ была выявлена квантовая добавка проводимости.

Обнаружено, что при увеличении температуры отжига пленок In_2O_3 увеличивается длина неупругого рассеивания электронов, а при увеличении температуры отжига пленок $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ длина неупругого рассеивания электронов в материале уменьшается.

Воронежский государственный технический университет

ELECTROTRANSPORT PROPERTIES WIDE-BANDGAP OXIDES AND MULTILAYER STRUCTURES

I.V. Babkina, O.V. Zhilova, K.G. Korolev, A.V. Makagonov, P.M. Hlopovskih

The films ZnO , In_2O_3 and a multilayer structure $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ are prepared. The structure and electrical properties of the films are investigated. X-rays studies have shown that the films of ZnO and In_2O_3 have fine-grained structure. Low-temperature resistance measurements revealed the presence of weak localization of conduction electrons for films In_2O_3 and $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$. It is found that with increasing annealing temperature in In_2O_3 films the length of inelastic scattering of electrons increases, and in films $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ it decreases.

Key words: wide-bandgap semiconductor, electrical and magnetoresistive properties, heterogeneous multilayer structure, a weak electron localization

Удельное электрическое сопротивление при различных температурных воздействиях на пленки ZnO , In_2O_3 и $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO})_{83}$ связано, не только с перестройкой структуры, но и с реализующимися при этих изменениях механизмами электропереноса.

Литература

1. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 345 с.
2. Ситников А.В. Электрические и магнитные свойства наногетерогенных систем металл – диэлектрик: дис. д-ра физ. – мат. наук – Воронеж, 2010. – 318 с.
3. Electrical properties and giant magnetoresistance of $\text{CoFeB} - \text{SiO}_2$ amorphous granular composites [text] / Yu.E. Kalinin, A.V. Sitnikov, O.V. Stognei, I.V. Zolotukhin, P.V. Neretin // *Mat. Scien. and Engin.* – 2001. – A 304 – 306. – P. 941 – 945.
4. Влияние толщины полупроводниковой прослойки на электрические и магнитные свойства многослойной наноструктуры $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{33.9}(\text{SiO}_2)_{66.1}]/[\text{In}_{35.5}\text{Y}_{4.2}\text{O}_{60.3}]\}_{93}$ [Текст] / И.В. Бабкина, К.С. Габриельс, О.В. Жилова, А.В. Ситников, Ю.Е. Калинин // *Вестник Воронежского государственного технического университета.* – 2013. – Т. 9. – №6-1. – С. 86 – 91.
5. Георгобини А.Н. Физика соединений A_2B_6 . – Москва: Наука, 1986. – С. 320.
6. J. De Merchant, M. Cocivera. Preparation and doping of zinc oxide using spray pyrolysis. - *Chem. Mater.* -1995. – V.7, №9. – P. 1742 - 1749.
7. Кнунянц И.Л. Химическая энциклопедия.—М.: Советская энциклопедия, 1990. — Т. 2. — 671 с.
8. D.C. Looka Electrical and optical properties of defects and impurities in $\text{ZnO}/\text{C.Co}$. - *Physica B.*- 2003. - V.340–342 - P32
9. Гантмахер В. Ф. Электроны в неупорядоченных средах.. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 232 с.

СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТОВ ФЕРРОМАГНЕТИК-ДИЭЛЕКТРИК

Х.С.М. Аль Аззави, К.Г. Королев, В.А. Макагонов, А.В. Ситников, О.С. Тарасова

Методом ионно-лучевого распыления получены пленки композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и многослойных структур $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x} + \text{N}_2]\}_n$, $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$, $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$ и $\{[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$ при циклической подаче реактивных газов в процессе осаждения. Исследованы структура и электрические свойства пленок. Показано, что пленки имеют слоистую структуру. Установлено, что реактивные газы, используемые для получения прослоек, увеличивают электрические свойства гетерогенных структур по сравнению с композитами, синтезированными в атмосфере аргона

Ключевые слова: структура, электрические свойства, композиты, многослойные гетерогенные структуры

Введение

Композиты из ферромагнитной фазы в диэлектрической матрице (магнитодиэлектрики) уже многие годы применяются в качестве высокочастотных магнитных материалов в катушках индуктивности фильтров, генераторов, частотомеров, контуров приемников и других устройствах электроники. Для увеличения рабочей частоты электронных устройств размер металлических включений в диэлектрической матрице необходимо уменьшать, создавая нанокompозиты. Гранулированные нанокompозиты это искусственно созданные среды, состоящие из металлических гранул (2-10 нм) случайным образом распределенных в диэлектрической матрице. Такие композиты, благодаря уникальной наноструктуре и относительной простоте изменения концентрации частиц, представляют собой почти идеальные системы для исследования физических свойств наноструктурированных материалов и обладают хорошими высокочастотными магнитными свойствами [1-3]. Расширение частотного диапазона обусловлено более высоким удельным электрическим сопротивлением наногетерогенных структур (ρ) по сравнению с материалом ферромагнитной фазы, так и наномасштабным размером структурных неоднородностей.

Если представить композит, как совокупность наноразмерных металлических гранул, хаотично распределенных в диэлектрической матрице, то очевидно, что величина ρ определяется соот-

ношением проводящей и изолирующей фаз [4-5]. При этом в качестве ферромагнитной фазы композитов используются переходные металлы Co, Fe, Ni или сплавы на их основе [6-8], тогда как оксиды Si, Al, Zr, Cr, Hf или фториды Mg, Ca формируют высокоомную матрицу [9-14].

Основными критериями протекания процесса самоорганизации гетерогенной структуры при росте пленки из паровой фазы, приводящей к формированию нанокompозита, является отсутствие взаимной растворимости между образующимися фазами химических соединений между компонентами [15]. Если учитывать, что состав фаз гетерогенных систем содержит различные атомы и их химические соединения, а распыление происходит ионно-плазменным методом, то моделирование процесса самоорганизации гетерогенной структуры является достаточно сложной задачей. Пространственная морфология металлических гранул и кластеров зависит от многих параметров и изотропное их распределение в объемном композите скорее исключение, чем правило. Так в работах [16-18] сообщается о наличии перпендикулярной магнитной анизотропии композитов некоторых составов, расположенных выше порога перколяции. Это обусловлено значительной структурной анизотропией пленок. Проведенный анализ причин формирования ростовой структурной анизотропии при конденсации пленки из паровой фазы позволил качественно объяснить наблюдаемую перпендикулярную к плоскости пленки магнитную анизотропию в композитах $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и отсутствие последней в пленках $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ [19].

Исследования гетерогенных систем, полученных при напылении в среде, содержащей активные газы, показали, что в этом случае происходит доокисление диалектической матрицы и

Хэйд С. Мохамед Аль Аззави – ВГТУ, аспирант, тел. 8 (473)246-66-47

Королев Константин Геннадьевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, тел. 8(473)246-66-47

Макагонов Владимир Анатольевич – ВГТУ, инженер, e-mail: vlad_makagonov@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

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-02-97511-р_центр_a

образование оболочки из оксидов металла на поверхности металлических частиц [20-21]. Наличие на поверхности металлических наногранул оксидной оболочки препятствует непосредственному контакту проводящих частиц и, как следствие, увеличивает удельное электрическое сопротивление гетерогенной системы. Кроме того, оксидные оболочки металлических гранул снижают вероятность формирования столбчатой структуры пленки. Однако, с другой стороны, немагнитные прослойки между ферромагнитными наночастицами уменьшают магнитное взаимодействие между металлическими гранулами и при комнатной температуре пленка будет находиться в суперпарамагнитном состоянии. Такое магнитное состояние системы характеризуется невысокими значениями магнитной проницаемости и высокими значениями полей намагничивания насыщения.

В данной работе рассматривается возможность формирования многослойной гетерогенной структуры, где слой композита, полученного в инертной атмосфере, чередуется с композиционной прослойкой, полученной в среде, содержащей активный газ. Такие гетерогенные структуры, с одной стороны, должны иметь более высокое удельное электрическое сопротивление, а с другой - менее выраженную перпендикулярную магнитную анизотропию ферромагнитных пленок.

2. Методика получения и структура формируемых пленок

Пленки гетерогенных систем $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ получены ионно-лучевым распылением составных мишеней в широком диапазоне концентраций металлической фазы по методике, описанной в [22].

Получение многослойных гетерогенных систем $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}+\text{N}_2]\}_n$, $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$, $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$ и $\{[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}+\text{O}_2]\}_n$ было осуществлено по следующей технологии. В течение 47 секунд производилось напыление композита в атмосфере аргона, затем 15 секунд в атмосфере аргона с добавлением азота или кислорода при тех же условиях, что и для объемных композитов. Установление номинального давления реактивных газов после включения клапана натекателя составляло 4 секунды, их откачка при выключении клапана натекателя - 8 секунд. По скорости и времени напыления композитов были сделаны оценки толщины слоев многослойной структуры, которые составили для прослойки композитов, осажденных в атмосфере аргона $\sim 8-14$ нм, в атмосфере $\text{Ar}+\text{O}_2$ (N_2) $\sim 3-5$ нм.

Элементный состав пленок проводили энергодисперсионной рентгеновской приставкой Oxford INCA Energy 250 на сканирующем электронном микроскопе JEOLJSM-6380 LV.

Удельное электрическое сопротивление было измерено методом амперметра-вольтметра на постоянном токе.

Структурные особенности гетерогенных пленок исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) в центре коллективного пользования Белгородского государственного университета. Малоугловая рентгеновская дифракция пленок проводилась на дифрактометре BRUKERD2 PHASER.

Как уже было сказано выше, основной целью работы было получение многослойных гетерогенных пленок, в которых подавляется структурная анизотропия. При конденсации из паровой фазы рост пленки существенно различен в плоскости подложки и перпендикулярно ей. Анизотропия гетерогенной структуры определяется методами получения. В зависимости от состава композита структурная неоднородность может быть выражена в большей или меньшей степени. Так в случае композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$ (рис. 1) мы имеем слабо выраженную анизотропию распределения металлических гранул. Когда рассматриваем композит $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ (рис. 2) можно определить структуру пленки, как «столбчатую».

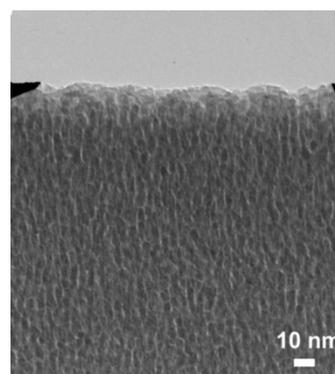


Рис. 1. Микрофотография поперечного разреза пленки наногранулированного композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$

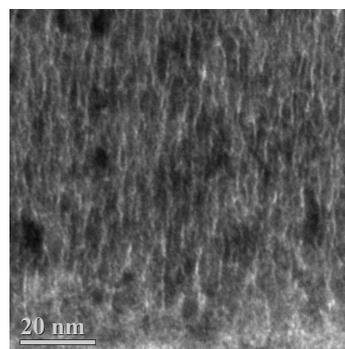


Рис. 2. Микрофотография поперечного сечения пленки композита $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$

В плоскости пленки исследования ТЕМ не выявили существенной анизотропии гетерогенной структуры (рис. 3). Металлические гранулы, размер которых составляет 6-7 нм, хаотически распределены в плоскости образца. Электронограмма представляет из себя ряд диффузных гало от

различных фаз композита. Внутреннее кольцо соответствует оксиду кремния, внешнее – металлическим гранулам. Наличие гало свидетельствует об аморфном или мелко дисперсной структуре фаз.

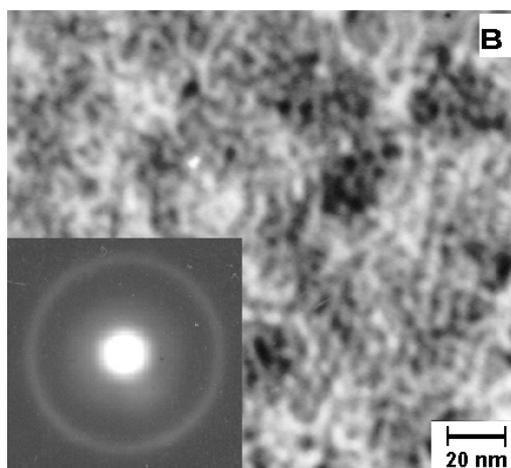


Рис. 3. Микрофотография и электронограмма гранулированного композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{52}(\text{SiO}_2)_{48}$

Микрофотография поперечного сечения пленки многослойной гетерогенной структуры $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40} + \text{O}_2]\}_{176}$ (рис.4), показывает наличие наноразмерных параллельных плоскости пленки слоев, наличие которых существенно затрудняет образование цепочек гранул, выстроенных перпендикулярно поверхности подложки.

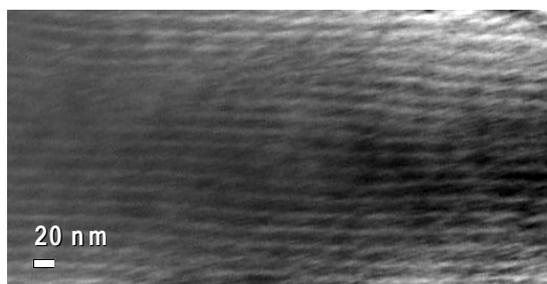


Рис. 4. Микрофотография поперечного разреза пленки многослойной гетерогенной структуры $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40} + \text{O}_2]\}_{176}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек 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

Анализ исследуемых выше гетерогенных структур показал, что последние имеют неоднородности (металлические гранулы и толщины слоев) масштаба несколько нанометров. Можно предположить, что при некоторых условиях возможна дифракция на подобных особенностях структуры пленок при малых углах отражения рентгеновских лучей. На рис. 5-8 представлены дифрактограммы композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

различного состава и многослойных структур композит-композит на их основе. Из приведенных зависимостей следует, что в композите $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7}$ с малым содержанием металлической фазы, полученном в инертной среде (рис.5а) и в многослойных структурах, когда прослойки состоят из композитов с малыми значениями x (рис. 5с, 5d, 7d и 8с) наблюдается дифракционный максимум с характеристическим размером $d = 2.4 \div 2.8$ нм. В композитах, полученных в среде с активными газами (рис. 5b), а также композитах и многослойных структурах с большим содержанием металлической фазы (рис. 6а,b,c; 7а,b,c и 8а,b) данный максимум отсутствует. Эти экспериментальные данные можно объяснить, если предположить, что дифракция происходит от отдельных металлических наночастиц, внедренных в диэлектрическую матрицу. Когда увеличивается доля металлической фазы, частицы объединяются и формируют проводящий кластер соприкасающихся металлических гранул, при котором условия дифракции не выполняются (рис. 6а,b,c, 7а,b,c и 8а,b). В случае добавления активного газа в процессе напыления возможно полное окисление металлических частиц и формирование гомогенной пленки оксидов металлов (рис. 5b). Следует обратить внимание на рис. 6d, когда в пленке композита $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{56,6}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{43,4}$ проявляется дифракция рентгеновских лучей от металлических гранул, если сравнить дифрактограммы от композита, полученного в атмосфере Ar и Ar + O_2 .

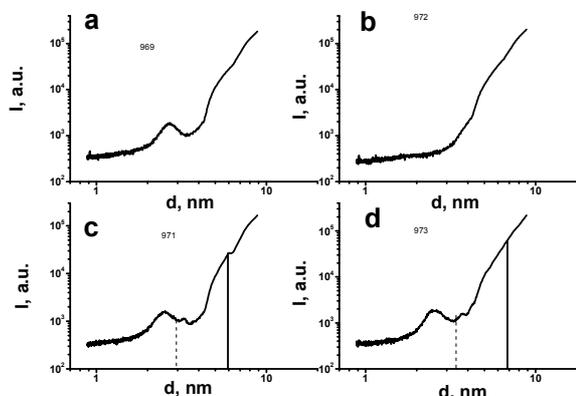


Рис. 5. Дифрактограммы композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7}$, полученных в атмосфере Ar (а), Ar + O_2 ($P_{\text{Ar}}=2,6 \cdot 10^{-4}$, $P_{\text{O}_2}=2,8 \cdot 10^{-5}$ Торр) (b) и многослойных структур: $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7} + \text{N}_2]\}_{300}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $2,4 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и атмосфере Ar с давлением $2,4 \cdot 10^{-4}$ Торр + N_2 с давлением $7,6 \cdot 10^{-5}$ Торр в течение 15 сек (с), $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7} + \text{O}_2]\}_{300}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $1,6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и атмосфере Ar с давлением $1,6 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $1,6 \cdot 10^{-5}$ Торр в течение 15 сек (d)

Кроме максимумов, обусловленных рентгеновской дифракцией от металлических частиц, можно

видеть пики, имеющие иную природу. Анализ положения максимумов, их интенсивности и рассчитанной толщины многослойных структур свидетельствует, что мы имеем дифракцию от бислоев многослойной гетерогенной пленки. На рис. 5а проявляются два пика, соответствующие двум модам дифракции от бислоев пленки $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7}+\text{N}_2]\}_{300}$, на рис. 5d, 7с и 7d проявилась вторая мода дифракции от бислоя пленки $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{16,3}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{83,7}+\text{O}_2]\}_{300}$, $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{64,5}(\text{SiO}_2)_{35,5}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{64,5}(\text{SiO}_2)_{35,5}+\text{O}_2]\}_{178}$ и $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{20,3}(\text{SiO}_2)_{79,7}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{20,3}(\text{SiO}_2)_{79,7}+\text{O}_2]\}_{178}$ толщиной 7, 11 и 8 нм, соответственно.

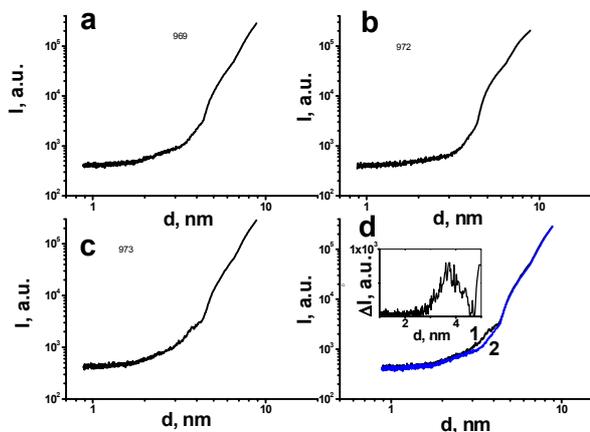


Рис. 6. Дифрактограммы композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{56,6}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{43,4}$, полученных в атмосфере Ar (a) и кривая 1 (d), Ar + O₂ ($P_{\text{Ar}}=2,6 \cdot 10^{-4}$, $P_{\text{O}_2}=2,8 \cdot 10^{-5}$ Торр) (b) и многослойных структур: $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{56,6}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{43,4}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{56,6}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{43,4}+\text{O}_2]\}_{300}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $1,6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и атмосфере Ar с давлением $1,6 \cdot 10^{-4}$ Торр + O₂ с давлением $1,6 \cdot 10^{-5}$ Торр в течение 15 сек (c) и кривая 2(d). Вставка на рис d - разница интенсивностей дифракционных кривых 1 и 2

Стоит заметить, что максимумы дифракции от многослойной структуры слабо выражены, что может быть объяснено двумя причинами. Во первых, интерфейс между слоями не резкий по причине медленного изменения давления активного газа при напуске и откачке (см. выше). Во вторых, в дифрактометре при малых углах регистрации существенно возрастает фон измерения. Еще одной причиной, препятствующей выявлению данных максимумов, может быть совпадение характеристических размеров металлических гранул и толщины бислоев (см. рис. 8с).

3. Электрические свойства

В рамках данной работы были получены многослойные гетерогенные структуры, где слой

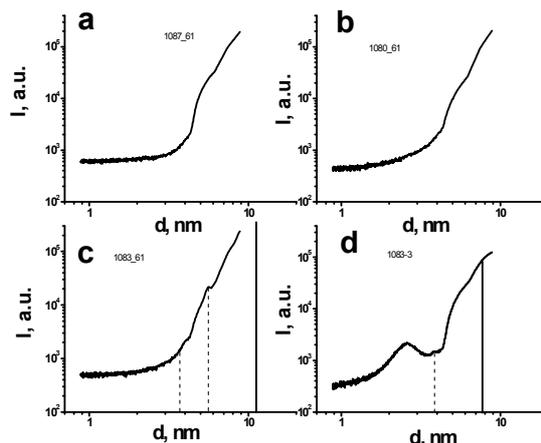


Рис. 7. Дифрактограммы композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{64,5}(\text{SiO}_2)_{35,5}$, полученных в атмосфере Ar (a), Ar + O₂ ($P_{\text{Ar}}=6,0 \cdot 10^{-4}$, $P_{\text{O}_2}=2,0 \cdot 10^{-5}$ Торр) (b) и многослойных структур: $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{64,5}(\text{SiO}_2)_{35,5}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{64,5}(\text{SiO}_2)_{35,5}+\text{O}_2]\}_{178}$ (c), $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{20,3}(\text{SiO}_2)_{79,7}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{20,3}(\text{SiO}_2)_{79,7}+\text{O}_2]\}_{178}$ (d), полученных при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $6,0 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и атмосфере Ar с давлением $6,0 \cdot 10^{-4}$ Торр O₂ с давлением $3,2 \cdot 10^{-5}$ Торр в течение 15 сек

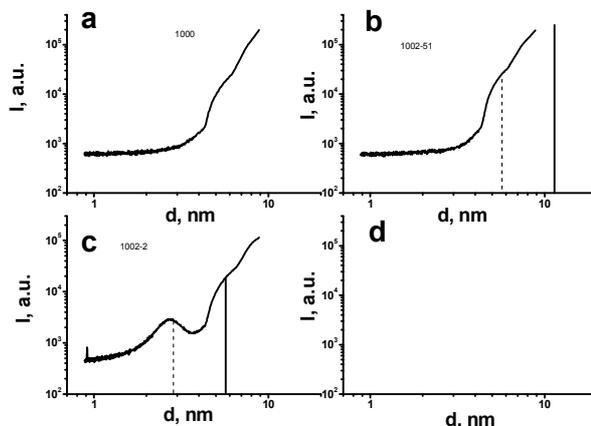


Рис. 8. Дифрактограммы композита $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{59,5}(\text{SiO}_2)_{40,5}$, полученного в атмосфере Ar + O₂ ($P_{\text{Ar}}=8,0 \cdot 10^{-4}$, $P_{\text{O}_2}=3,2 \cdot 10^{-5}$ Торр) (a) и многослойных структур: $\{[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{59,5}(\text{SiO}_2)_{40,5}]/[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{59,5}(\text{SiO}_2)_{40,5}+\text{O}_2]\}_{335}$ (b) и $\{[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{18,9}(\text{SiO}_2)_{81,1}]/[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{18,9}(\text{SiO}_2)_{81,1}+\text{O}_2]\}_{335}$ (c), полученных при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $9,2 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и атмосфере Ar с давлением $9,2 \cdot 10^{-4}$ Торр + O₂ с давлением $5,0 \cdot 10^{-5}$ Торр в течение 15 сек

композиата, полученного в инертной атмосфере, чередуется с композиционной прослойкой, полученной в среде, содержащей активный газ. Удельное электрическое сопротивление композитов является структурно-чувствительным параметром перколяционных систем, у которых обычно наблю-

дается S - образная концентрационная зависимость [23-26]. Для многослойных структур композит-композит следует ожидать, что при одинаковом элементном составе величины удельных электрических сопротивлений будут выше, чем у композитов, полученных в инертной среде, и ниже чем у гетерогенных структур, осажденных в среде с активными газами.

Действительно, анализ зависимостей $\rho(x)$, представленных на рис. 9-11, показывает справедливость описанных выше предположений. Единственным исключением является ход зависимостей $\rho(x)$ для композитов $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$, полученных в атмосфере Ar с давлением $9,2 \cdot 10^{-4}$ Торр и O_2 с давлением $3,2 \cdot 10^{-5}$ Торр, а также многослойных гетерогенных структур $\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x} + O_2]\}_{180}$, полученных при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $9,6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 58 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $9,6 \cdot 10^{-4}$ Торр и O_2 с давлением $3,4 \cdot 10^{-4}$ Торр) в течение 34 сек (рис. 10, кривые 2 и 5 соответственно). Такое различие, вероятно связано со значительно большим количеством кислорода в атмосфере в случае формирования многослойной пленки относительно однослойного композита.

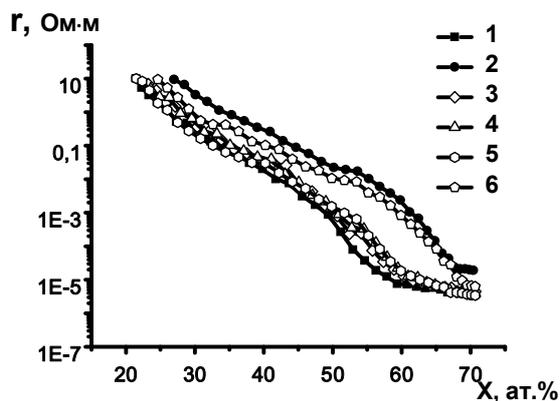


Рис. 9. Концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления композитов $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$, полученных в атмосфере Ar (кривая 1) и в смешанной атмосфере Ar с давлением $5,6 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $2,4 \cdot 10^{-5}$ Торр (4,3 пар. %) (кривая 2), а также многослойных структур $\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x} + O_2]\}_n$, полученных при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $2,4 \cdot 10^{-5}$ Торр) в течение 15 сек (кривая 3), при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $3,2 \cdot 10^{-5}$ Торр) в течение 15 сек (кривая 4), при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $6,3 \cdot 10^{-5}$ Торр) в течение 15 сек (кривая 5) и при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $5,9 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $1 \cdot 10^{-4}$ Торр) в течение 15 сек (кривая 6)

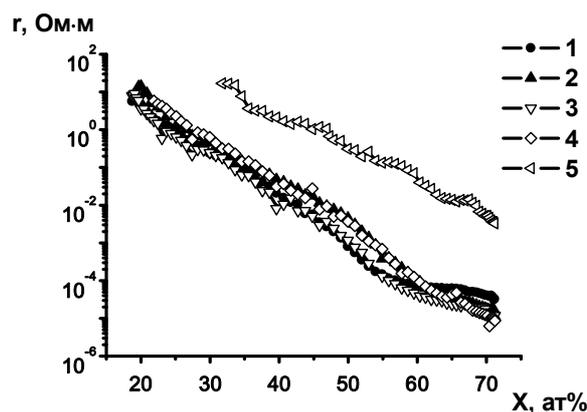


Рис. 10. Концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления композитов $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$, полученных в атмосфере Ar (кривая 1) и в смешанной атмосфере Ar с давлением $9,2 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $3,2 \cdot 10^{-5}$ Торр (кривая 2), а также многослойных гетерогенных структур: $\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x} + O_2]\}_{335}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $9,2 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $9,2 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $5,0 \cdot 10^{-5}$ Торр) в течение 15 сек (кривая 3), $\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x} + O_2]\}_{128}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $9,0 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $9,0 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $1,2 \cdot 10^{-4}$ Торр) в течение 15 сек (кривая 4), $\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x} + O_2]\}_{180}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $9,6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 58 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $9,6 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $3,4 \cdot 10^{-4}$ Торр) в течение 34 сек (кривая 5)

Наиболее быстрое изменение $\rho(x)$ происходит в районе порога перколяции ($X_{ПП}$), когда происходит смена механизмов электропереноса. Значения $X_{ПП}$ в многослойной структуре будут определяться слоями, не подвергшимся окислению композита. С другой стороны, в случае пленок, полученных в смешанной атмосфере, в которой присутствуют активные газы, происходит доокисление диэлектрической фазы и частичное или полное окисление металлических наночастиц. Следовательно, можно наблюдать значительное увеличение концентрации металлической фазы, соответствующей порогу протекания гетерогенной системы. Методика получения пленок, используемая в данной работе [22], позволяет получать серию образцов с непрерывно изменяющимся соотношением металлической и диэлектрической фаз в широком диапазоне концентраций металлической фазы в одном технологическом цикле осаждения пленок. Если сравнить две концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления композитов в исходном состоянии и после термической обработки при температурах, не приводящих к существенному изменению структуры системы, то можно определить порог протекания.

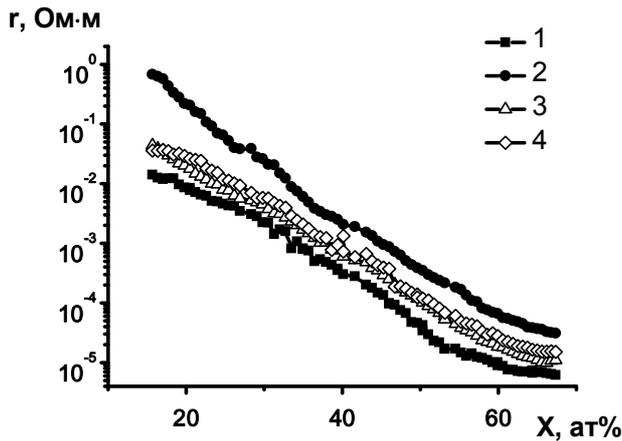


Рис. 11. Концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, полученных в атмосфере Ar (кривая 1) и в смешанной атмосфере Ar с давлением $8 \cdot 10^{-4}$ Торр + N_2 с давлением $7,6 \cdot 10^{-5}$ Торр (кривая 2), и многослойных структур: $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}] / [(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x} + \text{N}_2]\}_{300}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $8 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $8 \cdot 10^{-4}$ Торр + N_2 с давлением $6,5 \cdot 10^{-5}$ Торр) в течение 15 сек (кривая 3) и $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}] / [(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x} + \text{O}_2]\}_{300}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ar с давлением $8 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ar с давлением $8 \cdot 10^{-4}$ Торр + O_2 с давлением $2,0 \cdot 10^{-5}$ Торр) в течение 15 сек (кривая 4)

При термической обработке в образцах, находящихся до порога протекания, вследствие уменьшения дефектности структуры диэлектрика, вероятность туннелирования электронов из гранулы в гранулу уменьшается, а следовательно, возрастает значение ρ . Для образцов, находящихся после порога протекания, уменьшение дефектности границ раздела соприкасающихся гранул понижает

рассеивание носителей заряда в каналах проводимости бесконечной металлической сетки и значение ρ отожженных образцов уменьшается. Пересечение двух кривых можно считать порогом протекания.

На рис. 12, в качестве примера представлены концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ в исходном состоянии (кривая 1) и после термической обработки (кривая 2). Применение метода, описанного выше, позволило определить положение порога протекания исследуемых гетерогенных структур (см. табл.1) в виде диаграммы (рис. 13). Анализ представленных данных показывает, что наиболее значительное изменение положения порога протекания наблюдается при получении композита в среде, содержащей активные газы. Так добавление O_2 (4,2 пар. %) при синтезе композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ увеличивает порог протекания $X_{\text{ПП}}$ с 51,6 ат. % металлической фазы до 65 ат. %.

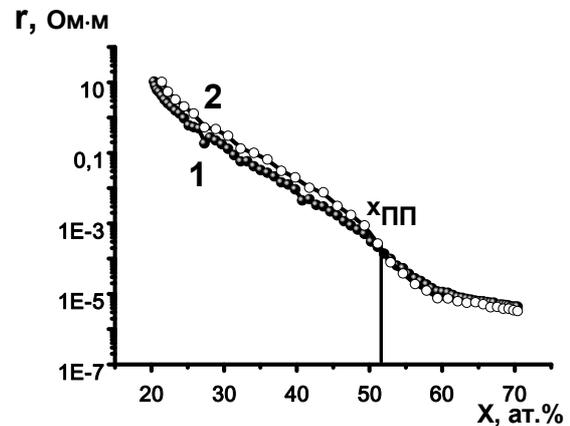


Рис. 12. Концентрационные зависимости удельного электрического сопротивления композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ в исходном состоянии (кривая 1) и после термической обработки при $T = 350$ °C в течение 30 минут (кривая 2)

Условия синтеза исследуемых гетерогенных структур

№ п/п	Партия	t_1 , с	$P_{\text{Ar}x}$ 10^{-4} , Торр	t_2 , с	$P_{\text{Ar}x}$ 10^{-4} , Торр	P_{O_2x} 10^{-4} , Торр	n
1	$(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$	18000	6	-	-	-	1
2	$(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$			18000	6	0,2	1
3	$(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$			18000	6	0,24	1
4	$\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}] / [(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$	47	6	15	6	0,24	176
5	$\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}] / [(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$	47	6	15	6	0,32	178
6	$\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}] / [(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$	47	6	15	6	0.63	176
7	$\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}] / [(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$	47	6	15	6	1	176
8	$(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$	15000	8				1
9	$\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}] / [(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x} + \text{N}_2]\}_n$	47	8	15	8	0.65	300

10	$\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_X(Al_2O_3)_{100-X}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_X(Al_2O_3)_{100-X}+O_2]\}_n$	47	8	15	8	0.2	300
11	$(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}$	18000	9,2				1
12	$(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}$			18000	9,2	0,32	1
13	$\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}+O_2]\}_n$	47	9,2	15	9,2	0,5	335
14	$\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}+O_2]\}_n$	47	9,2	15	9,2	1.4	290
15	$\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}+O_2]\}_n$	53	9,2	55	9,2	3.4	290

При циклической подаче кислорода изменение положения порога протекания не столь значительно. Так аналогичное парциальное давление O_2 в пленку $\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_X(SiO_2)_{100-X}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_X(SiO_2)_{100-X}+O_2]\}_{178}$ изменяет $X_{ПП}$ всего на 0,8 ат. %. Даже увеличение парциального давления кислорода до 16 ат. % не приводит к смещению $X_{ПП}$ слоистой структуры $\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_X(SiO_2)_{100-X}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_X(SiO_2)_{100-X}+O_2]\}_{176}$ выше 64 ат. %. Аналогичные зависимости

свойственны гетерогенным пленкам на основе композитов $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_X(SiO_2)_{100-X}$ и $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_X(Al_2O_3)_{100-X}$. Следовательно, можно предположить, что в многослойных гетерогенных структурах, представленных в данной работе, слои композитов, полученные в инертной атмосфере, не подвергались существенному влиянию реактивных газов, присутствующих при нанесении прослоек с присутствием O_2 (N_2).

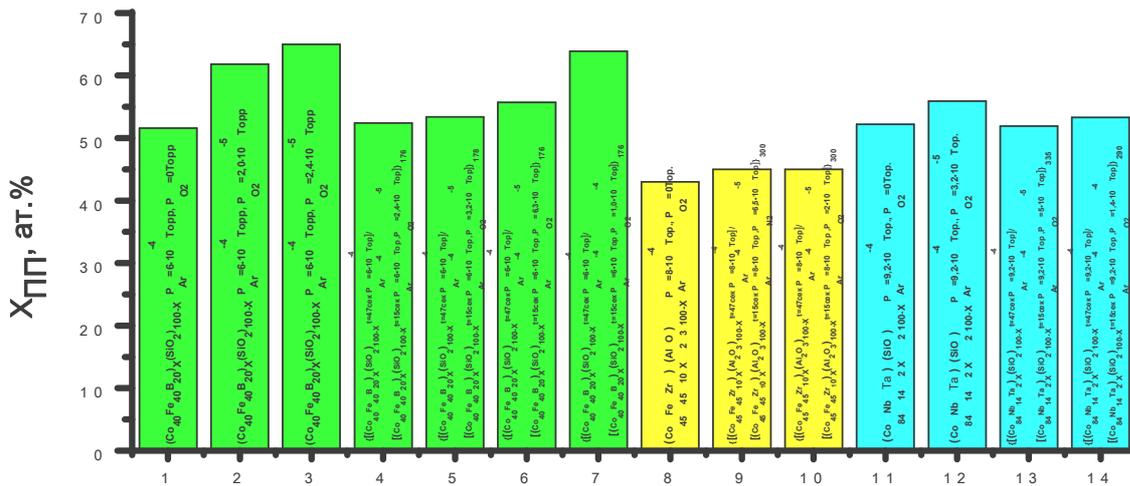


Рис. 13. Диаграмма положения порога протекания различных гетерогенных систем от технологических и структурных параметров. (Нумерация по оси X совпадает с № п/п таблицы)

4. Заключение

Методом ионно-лучевого распыления получены новые многослойные гетерогенные системы на основе композитов металл-диэлектрик. Анализ структуры синтезированных систем показал, что циклическое напыление композитов в атмосфере аргона и аргона с добавлением реактивного газа позволяет получить многослойную гетерогенную пленку с наноразмерными параллельными слоями, наличие которых существенно затрудняет образование цепочек гранул, выстроенных перпендикулярно поверхности подложки, которые характерны для объемных композитов.

Исследования концентрационных зависимостей удельного электрического сопротивления гетерогенные многослойные систем показало, что циклическое напыление композитов в атмосфере аргона и аргона с добавлением реактивного газа повышает $\rho(x)$ и порог протекания по сравнению с композитами, синтезированными в атмосфере аргона.

Литература

- Glatz A., Beloborodov I.S. Thermoelectric and Seebeck Coefficients of granular metals // Phys. Rev. B.- 2009.- V.79. - P. 235403.
- 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.

3. 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.

4. Beloborodov I. S., Lopatin A. V., Vinokur V. M., and Efetov K. B. Granular electronic systems // *Rev. Mod. Phys.* – 2007. – V.79. - N.2. - P. 469 – 520.

5. Guangduo Lu Influence of sputtering power on the high frequency properties of nanogranular FeCoHfO thin films Gngduo Lu, Huaiwu Zhang, John Q. Xiao, Feiming Bai, Xiaoli Tang, Yuanxun Li and Zhiyong Zhong // *J. Appl. Phys.* – 2011. – V.109. P. 07A327-07A330.

6. 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.

7. Timopheev A. Growth-induced perpendicular anisotropy of grains in Co-Al-O nanogranular ferromagnetic films / Timopheev A. Rabchenko S.M., Kalita V.M., Lozenko A.F., Trotsenko P. A., Stognei O. V., Sitnikov A.V // *Physics of the Solid State.* – 2011. – V.53. - N. 3. – P. 494-503.

8. Gridnev S. A., Gorshkov A. G., Sitnikov A. V., Kalinin Yu. E. Charge transfer and dielectric properties of granular nanocomposites Co_x(LiNbO₃)_{100-x} // *Physics of the Solid State.* – 2006. – V. 48.- P. 1186-1188.

9. 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.

10. Ohnuma S., Fujimori H., 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.

11. 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 micromagnetic device applications // *J. Appl. Phys.*- 2005. - V.97. - N.10. - P.- P.907-910.

12. Kanai S., Gajek M., Worledge D. C., Matsukura F., Oh H. Electric field-induced ferromagnetic resonance in a CoFeB/MgO magnetic tunnel junction under dc bias voltages // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – V.105. – P. 242409 – 242413.

13. Михайловский Ю.О., Метгус Д.Е., Казаков А.П., Прудников В.Н., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Гербер А., Бартон Д., Грановский А.Б. Аномальный эффект Холла в нанокompозитах (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(Al-O)_{100-x} // *Письма в ЖЭТФ.* - 2013. - Том 97. - Вып. 8. - С. 544-548.

14. Касюк Ю.В., Федотова Ю.А., Свито И.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В. Влияние ближнего порядка в наночастицах FeCoZr на электрические и магнитотранспортные свойства нанокompозитов FeCoZr-

CaF₂ // *Физика твердого тела.* - 2012. - № 10. - С. 1963-1970.

15. Иевлев В.И. Тонкие пленки неорганических материалов: механизм роста и структура // Изд.-пол. центр ВГУ. - 2008. - 495. с.

16. Ohnuma H., Hono K., Onoder H., Ohnuma S., Fujimori H., Pedersen J.S. Microstructures and magnetic properties of Co-Al-O granular thin films // *J. Appl. Phys.*- 2000 - V.87. - N2. - P.817-823.

17. 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.

18. 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.

19. Ситников А.В. Магнитные свойства и особенности формирования структуры наногранулированных композитов металл-диэлектрик // *Материаловедение.* – 2010. - №3. - С. 49-61.

20. Fedotova J. Effect of oxidshell on magnetic and magnetotransport characteristics of oxidized FeCoZr nanogranules in Al₂O₃ / Fedotova J., Kasiuk J., Przewoznik J., Kapusta Cz., Svito J., Kalinin Yu., Sitnikov A. // *J. of Alloys and Compounds* – 2011 - Vol. 509 - P. 9869-9875.

21. Saad A.M., Mazanik A.V., Kalinin Yu.E., Fedotova J.A., Fedotov A.K., Wrotek S., Sitnikov A.V., Svito J. Structure and electrical properties of CoFeZr-Aluminium oxide nanocomposite films // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2004 - v.8. - p.152-157.

22. Гриднев С.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. // Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 352 с.

23. Калинин Ю.Е., Ремизов А.Н., Ситников А.В. Электрические свойства аморфных нанокompозитов (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{1-x} // *ФТТ* – 2004 - т. 46. - В. 11 – С. 2076-2082.

24. Гриднев С.А., Горшков А.Г., Копытин М.Н., Ситников А.В., Стогней О.В. Электрические и диэлектрические свойства тонкопленочных наногетерогенных структур // *Известия РАН, сер. Физическая* – 2006 - т.70 - № 8. - С.1130-1133.

25. Калинин Ю.Е., Кудрин А.М., Пискарева М.Н., Ситников А.В., Звездин А.К. Электрические свойства аморфных гранулированных нанокompозитов (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x[Pb_{0,81}Sr_{0,04}(Na_{0,5}Bi_{0,5})_{0,15}(Zr_{0,575}Ti_{0,425})O₃]_{1-x} // *Перспективные материалы.* – 2007. - № 3. - С. 41-48.

26. Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. Физические свойства нанокompозитов металл-диэлектрик с аморфной структурой // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2007. - № 10. - С.9-21.

Воронежский государственный технический университет

STRUCTURE AND ELECTRICAL PROPERTIES OF MULTILAYER FILMS BASED ON FERROMAGNET-INSULATOR COMPOSITES

H.S. M. Al’Azzavi, K.G. Korolev, V.A. Makagonov, A.V. Sitnikov, O.S. Tarasova

By ion-beam sputtering have been obtained composites films (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{100-x}, (Co₈₄Nb₁₄Ta₂)_x(SiO₂)_{100-x}, (Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x} and multilayer structures {[Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{100-x}]/[(Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{100-x}+N₂]}_n, {[Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{100-x}]/[(Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{100-x}+O₂]}_n, {[Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x}]/[(Co₄₁Fe₃₉B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x}+O₂]}_n, {[Co₈₄Nb₁₄Ta₂)_x(SiO₂)_{100-x}]/[(Co₈₄Nb₁₄Ta₂)_x(SiO₂)_{100-x}+O₂]}_n in cyclic feeding reactive gases during the deposition. The structure and electrical properties of the films were investigate. It is shown that the films have a layered structure and it found that the reactive gases used for obtaining interlays increase electrical properties of heterogeneous structures compared to composites synthesized in argon atmosphere

Key words: structure, electrical properties, composites, layered heterogeneous structures

АМПЛИТУДНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КРИСТАЛЛЕ KN_2PO_4

Р.С. Алькхазали, Д.А. Лисицкий, Л.Н. Коротков

Изучены амплитудные зависимости диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) в сегнетоэлектрической фазе монокристалла дигидрофосфата калия. Обнаружен сильный рост $\text{tg}\delta$ в случае, когда измерительное поле превышает некоторое пороговое значение. В рамках модели, предусматривающей отрыв доменных границ от стопоров, определена температурная зависимость поля активации отрыва g . Показано, что наблюдаемое с понижением температуры возрастание поля g в окрестностях температуры «замораживания доменной структуры» обусловлено увеличением энергии взаимодействия доменных границ с дефектами кристаллической решетки

Ключевые слова: диэлектрические потери, сегнетоэлектрик, доменная граница, стопоры, поле активации

ВВЕДЕНИЕ

Дигидрофосфат калия (KN_2PO_4 , или KDP) привлекает внимание исследователей как модельный объект. Ниже температуры Кюри его диэлектрические свойства в значительной степени определяются процессами, связанными с состоянием и динамикой доменной структуры. Именно эти процессы ответственны за аномально высокую диэлектрическую проницаемость и значительную нелинейность ряда физических параметров ниже температуры Кюри [1-3].

Состояние доменной структуры существенно зависит от температуры и характера взаимодействия доменных границ с дефектами кристаллической решетки, а также от концентрации последних.

При приложении к кристаллу переменного электрического поля наблюдается колебание доменных границ относительно «точек закрепления», каковыми являются точечные дефекты. Если амплитуда электрического поля достаточно велика, то происходит отрыв доменных границ от стопоров, сопровождающийся, как правило, резким увеличением диэлектрического отклика.

Цель данной работы - выяснение закономерностей влияния амплитуды переменного электрического поля на диэлектрические свойства дигидрофосфата калия.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты проводили с использованием образцов в форме прямоугольных пластин с размерами $\approx 6 \times 7 \times 0,7$ мм. Серебряные электроды были нанесены на поверхности, перпендикулярные тетра-

гональной оси c кристалла методом термического распыления в вакууме.

Для изучения эффективной нелинейной диэлектрической проницаемости использовали емкостной мост, на который подавали от внешнего низкочастотного генератора регулируемое синусоидальное измерительное напряжение частотой 3 кГц и амплитудой $V = 0,3 - 15$ В.

Образец был помещен в криостат, где температура изменялась от 74 до 300 К и контролировалась с погрешностью не более $\pm 0,1$ К.

Амплитудные зависимости диэлектрической проницаемости (ϵ) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) исследовались в условиях термостабилизации. При этом колебания температуры не превышали $\pm 0,2$ К.

Наряду с исследованиями амплитудных характеристик, в ходе эксперимента была изучена температурная зависимость ϵ в режиме медленного нагрева образца при амплитуде измерительного поля $E = 4$ В/см.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ДИСКУССИЯ

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости кристалла KDP показана на рис. 1.

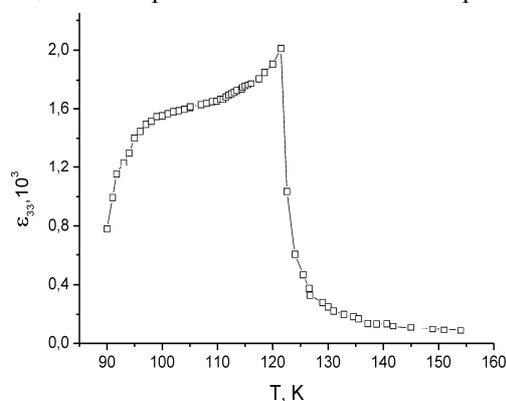


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Алькхазали Рафид Саббар – ВГТУ, магистрант, e-mail: l_korotkov@mail.ru
 Лисицкий Дмитрий Александрович – ВГТУ, аспирант, e-mail: d.a.lisitsky@mail.ru
 Коротков Леонид Николаевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: l_korotkov@mail.ru

Полученная кривая имеет типичный для этого материала вид. Максимум ε расположен около температуры 121,5 К, соответствующей температуре сегнетоэлектрического фазового перехода (T_C) в дигидрофосфате калия. Ниже T_C , в интервале $\approx 100 - 120$ К наблюдается характерная кристаллов этого семейства область плато [1 - 3], в пределах которой диэлектрическая проницаемость сравнительно слабо изменяется, оставаясь достаточно высокой.

Выше T_C с повышением температуры происходит быстрый спад ε .

Эксперимент показал, что при температурах, лежащих ниже T_C , диэлектрическая проницаемость образца и тангенс угла диэлектрических потерь существенно зависят от амплитуды измерительного поля. Это проиллюстрировано на рис. 2, где показаны зависимости $\text{tg}\delta(E)$.

Видно, что при напряженности измерительного поля E меньше некоторой критической величины (E_n) $\text{tg}\delta$ практически не зависит от E . Однако при $E > E_n$ происходит быстрый рост диэлектрических потерь. При этом пороговое напряжение монотонно снижается с повышением температуры по мере приближения к T_C .

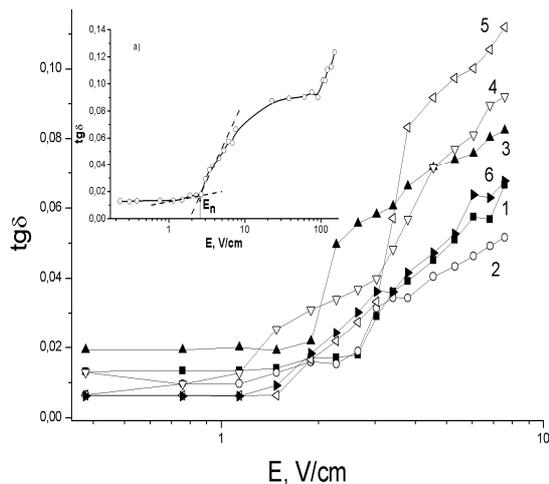


Рис. 2. Амплитудные зависимости $\text{tg}\delta$ при температурах 92 (1), 98 (2), 104 (3), 108 (4), 112 (5) и 116 (6) К

Можно убедиться, что на участке «резкого возрастания» тангенса угла диэлектрических потерь его зависимость от напряженности измерительного поля удовлетворительно описывается соотношением [2]:

$$\text{tg}\delta = A E^{-1} \exp(-g^2/E^2). \quad (1)$$

Это проиллюстрировано на рис. 3, где в полупрологарифмическом масштабе показаны зависимости $\text{tg}\delta$ от E^{-2} . Видно, что эти зависимости представляют собой прямые линии, что подтверждает корректность применения соотношения для описания экспериментальных результатов.

Полагая, что для кристалла KDP энергия вза-

имодействия доменной стенки с точечным дефектом $U \approx 0,1 \text{ эВ} = 1,602 \times 10^{-20}$ [7], а ее толщина $d \approx 10^{-9}$ м [4], получаем по формуле [2]:

$$f_i = 2U/d, \quad (2)$$

оценку величины закрепляющей силы: $f_i \approx 3,2 \cdot 10^{-11}$ Н.

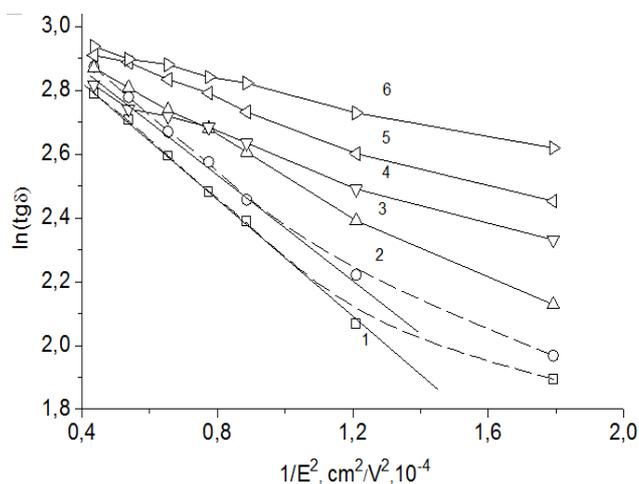


Рис. 3. Зависимости $\ln(\text{tg}\delta)$ от $1/E^2$ для температур 92 (1), 98 (2), 104 (3), 108 (4), 112 (5) и 116 К (6)

Используя экспериментальные зависимости $\ln(\text{tg}\delta)$ для номинально чистых кристаллов, показанные на рис. 3, оцениваем вслед за [2, 5] концентрацию дефектов в образце $C \approx 1.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и величину площади участка $S \approx 0.5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^2$. Поскольку зависимость $\ln(\text{tg}\delta)$ от E^{-2} представляет собой прямую линию, то ее угловой коэффициент, согласно (1), определяется величинами P_s , f_i и S . Это дает возможность, подставив значение $P_s = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/см}^2$ [1], найти величину силы $f_i \approx 3,6 \cdot 10^{-11}$ Н.

Совпадение порядков величины силы закрепления доменной границы, оцененной двумя различными способами, позволяет утверждать возможность реализации данного механизма диэлектрических потерь в исследованных кристаллах.

Рассмотрим теперь температурную зависимость квадрата поля активации, представленную на рис. 4.

На этой зависимости можно выделить, по меньшей мере, 3 участка. При температурах ниже ≈ 105 К (область I) зависимость $g^2(T)$ убывает с повышением температуры по закону близкому к линейному. В окрестностях 105 К (область II) скорость ее убывания уменьшается. Однако, при дальнейшем повышении температуры, по мере приближения к T_C , темп спада кривой $g^2(T)$ вновь увеличивается (область III) и при $T \rightarrow T_C$ величина поля активации принимает нулевое значение. Проанализируем зависимость $g^2(T)$ в рамках модели, предложенной в работе [2].

Согласно [4] для сегнетоэлектрика с фазовым переходом первого рода толщина доменной стенки дается формулой

$$d = \sqrt{\frac{\chi}{\gamma P_s^4 + 0,5\beta P_s^2}}, \quad (3)$$

где β , γ и χ - коэффициенты разложения термодинамического потенциала при P_s^2 , P_s^4 и $(\text{grad } P_s)^2$, соответственно.

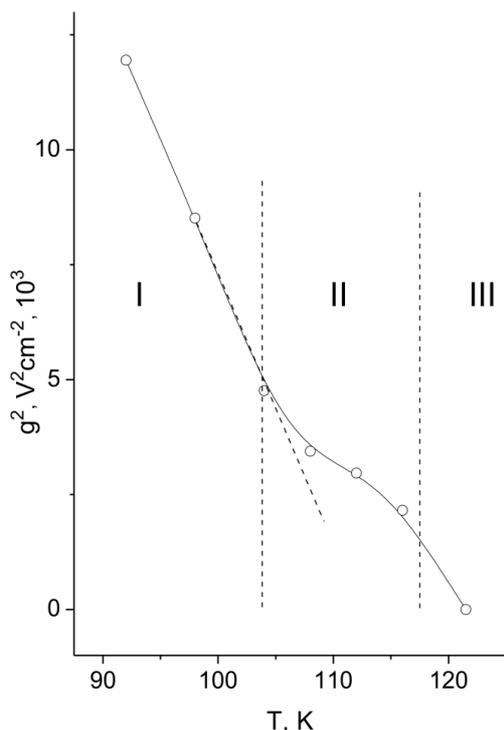


Рис. 4. Температурная зависимость квадрата поля активации

С учетом соотношений (2) и (3) выражение для поля активации g можно представить в виде:

$$g^2 = \frac{U^2 \gamma P_s^2}{\chi S^2} + \frac{U^2 \beta}{2\chi S^2}. \quad (4)$$

Примем во внимание, что коэффициенты разложения термодинамического потенциала γ , β и χ слабо изменяются с температурой (обычно они полагаются постоянными). Спонтанная поляризация P_s также слабо зависит от температуры при $T \ll T_C$, что соответствует области I. Тогда, очевидно, сильное уменьшение параметра g^2 с ростом температуры здесь может быть обусловлено двумя факторами: уменьшением энергии U и увеличением средней площади незакрепленного участка доменной стенки S . Последнее маловероятно, т.к. величина S опреде-

ляется концентрацией точечных дефектов, которая практически постоянна в этой области температур.

Таким образом, приходим к выводу, что уменьшение поля активации на участке I, наблюдаемое с повышением температуры, связано с уменьшением энергии взаимодействия доменных границ с дефектами.

Отметим, что данный вывод согласуется с результатами работы [8], в которой установлено сильное замедление релаксации диэлектрического отклика ниже ≈ 100 К, подчиняющееся закону Фогеля – Фулчера.

В области II величины, входящие в уравнение (4), слабо изменяются с температурой, поэтому и поле активации здесь изменяется относительно мало.

Вместе с тем вблизи температуры Кюри спонтанная поляризация P_s следует закону $P_s \sim (T_C - T)^{1/2}$ [4]. Тогда при условии, что величины U , S , γ , β и χ слабо изменяются с температурой, зависимость $g^2(T)$ должна быть линейно убывающей функцией температуры. Действительно, прямая линия (рис. 4) удовлетворительно аппроксимирует экспериментальные данные при температурах выше ≈ 116 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены амплитудные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрической фазе, анализ которых показал, что они могут быть удовлетворительно описаны в рамках модели [2], предусматривающий отрыв доменных стенок от точечных дефектов кристаллической решетки.

Определена температурная зависимость поля активации отрыва границ доменов от стопоров (g). Показано, что наблюдаемое с понижением температуры возрастание поля g в окрестностях температуры «замораживания доменной структуры» обусловлено увеличением энергии взаимодействия доменных границ с дефектами кристаллической решетки.

Установлено, что квадрат поля g линейно убывает с повышением температуры вблизи температуры Кюри. Это связано с ослаблением сил взаимодействия доменных стенок с дефектами вследствие ушрения последних.

Литература

1. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. М.: Мир, 1965. 556с.
2. Гриднев С.А., Даринский Б.М., Попов В.М., Шувалов Л.А. Амплитудные зависимости диэлектрических потерь в реальных кристаллах ТГС // ФТТ, 1986, Т. 28. N 7. С. 2009-2014.
3. Гриднев С.А., Камышева Л.Н., Сидоркин А.С. Сегнетоэлектрические кристаллы группы KN_2PO_4 . Воронеж: ВПИ, 1981. 116 с.
4. Сидоркин А.С. Доменная структура в сегнетоэлектриках и родственных материалах. - М.: Физматлит, 2000. 240 с.

5. Камышева Л.Н., Сердюк О.М., Дрождин С.Н., Зайцева О.А. Взаимодействие точечных дефектов с доменными стенками в водородсодержащих сегнетоэлектриках. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 6. С. 1667-1871.

6. Короткова Т.Н., Коротков Л.Н. Амплитудные зависимости диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в смешанном кристалле $K_{0,88}(NH_4)_{0,12}H_2PO_4$ // Известия РАН, сер. физическая, 2013, том 77, № 8, с. 1138 – 1141

7. Paul B., Albers J., Muser H.E. Dielectric constant in KDP at ultralow frequencies // Ferroelectrics. Vol. 14. P. 707-709.

8. Yuang Y.N., Waang Y.N., Li X., Ding Y. Domain freezing in KDP and TGS // J. Korean Phys. Soc. 1998. Vol. 32. P. S733 – S736.

Воронежский государственный технический университет

AMPLITUDE DEPENDENCE OF DIELECTRIC LOSSES IN THE KH_2PO_4 CRYSTAL

R.S. Al'khazaali, D.A. Lisitsky, L.N. Korotkov

Amplitude dependences of dielectric losses ($\text{tg}\delta$) have been studied for ferroelectric phase of potassium dihydrogen phosphate single crystal. It was found that at measurement fields E exceeding some critical value, dependence of $\text{tg}\delta(E)$ can be described within a model that includes the depinning of domain walls from lattice point defects. The activation field of depinning is grow appreciably when approaching to the "domains freezing temperature", that caused by increasing of domain walls and lattice defects interaction

Key words: dielectric losses, ferroelectric, depinning of domain walls, activation field

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ НАНОКОМПОЗИТОВ ФЕРРОМАГНИТНЫЙ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИК

Х.С.М. Аль Аззави, К.Г. Королев, В.А. Макагонов, А.В. Ситников, О.С. Тарасова

Методом ионно-лучевого распыления получены пленки композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и многослойных гетерогенных структур $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x} + \text{N}_2]\}_n$, $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$, $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$, $\{[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$ при циклической подаче реактивных газов в процессе осаждения. Исследовано влияние структуры и магнитостатических свойств пленок на концентрационные зависимости комплексной магнитной проницаемости образцов на частоте 50 МГц. Показано, что введение окисленной прослойки позволило подавить перпендикулярную магнитную анизотропию в композитах $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ при концентрации металлической фазы выше порога перколяции

Ключевые слова: многослойные гетерогенные структуры, композит, комплексная магнитная проницаемость, кривые намагничивания, ферромагнитные гранулы, высокочастотные свойства

1. Введение

Аморфные металлические сплавы на основе переходных металлов обладают магнитно-мягкими свойствами, что обусловлено отсутствием дефектов структуры, соизмеримых с характеристическими размерами доменных стенок [1-3]. Основными причинами возникновения магнитной анизотропии в аморфных металлических сплавах являются анизотропия формы, анизотропия парного упорядочения атомов, магнитоупругая анизотропия, наведенная магнитная анизотропия [4]. Для магнитных материалов, применяемых в аппаратуре для записи и воспроизведения информации, устройств автоматики, поглотителей электромагнитного излучения и т.д. наиболее важны их высокочастотные магнитные свойства. Одним из ограничений применения аморфных металлических сплавов в области ВЧ- и СВЧ-диапазона является их низкое удельное электрическое сопротивление. Для повышения этого важного параметра ферромагнетики с аморфной и кристаллической структурой вводят в диэлектрическую матрицу [5-6], что способствует повышению рабочей частоты гетерогенного материала в область ВЧ- и СВЧ-диапазона [7-8].

Особое место среди композитов ферромагнетик-диэлектрик занимают нанокompозиты с

аморфной структурой наногранул. Как показано в [9-10] такие пленки обладают ярко выраженными магнитно-мягкими свойствами. Это обусловлено как повышенным удельным электрическим сопротивлением (ρ) гетерогенных структур, так и наномасштабным размером структурных неоднородностей. Для таких нанокompозитов наличие аморфной структуры ферромагнитных гранул приводит к снижению значений магнитной анизотропии гранул по сравнению с композитами, обладающими кристаллической магнитной фазой [11]. Вместе с тем магнитная анизотропия аморфных нанокompозитов остается достаточно высокой по сравнению с гомогенными аморфными сплавами, что связано со значительным вкладом в эффективную анизотропию гранулы анизотропии формы последней, возникающей при росте пленки в результате процессов самоорганизации.

Так в работах [12, 13] сообщается о наличии перпендикулярной магнитной анизотропии композитов некоторых составов, расположенных выше порога перколяции. Это обусловлено значительной структурной анизотропией пленок. Проведенный анализ причин формирования ростовой структурной анизотропии при конденсации пленки из паровой фазы позволил качественно объяснить наблюдаемую перпендикулярную к плоскости пленки магнитную анизотропию в нанокompозитах $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$, $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и отсутствие последней в пленках $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ [14].

Исследование гетерогенных систем, полученных при напылении в среде с активными газами, показало, что в этом случае происходит доокисление диэлектрической матрицы и образование оболочки из оксидов металлов на поверхности метал-

Хэйдр С. Мохамед Аль Аззави – ВГТУ, аспирант, тел. 8(473) 246-66-47

Королев Константин Геннадьевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, тел. 8(473) 246-66-47

Макагонов Владимир Анатольевич – ВГТУ, инженер, e-mail: vlad_makagonov@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

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-02-97511-р_центр_a

лических частиц [15, 16]. Наличие на поверхности металлических наногранул оксидной оболочки препятствует непосредственному контакту проводящих частиц и, как следствие, увеличивает удельное электрическое сопротивление гетерогенной системы, а также снижает вероятность формирования столбчатой структуры пленки.

В данной статье рассматривается возможность подавления перпендикулярной магнитной анизотропии в пленках композитов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$, $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$ и $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$ за счет формирования многослойной гетерогенной структуры, где слой композита, полученного в инертной атмосфере, чередуется с композиционной прослойкой, полученной в среде, содержащей активный газ, а также исследовано влияние изменения морфологии пленки на высокочастотные свойства многослойных систем.

2. Методика получения и исследования физических свойств

Пленки гетерогенных систем $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$, $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$ и $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$ получены ионно-лучевым распылением составных мишеней в широком диапазоне концентраций металлической фазы [9].

Пленки многослойных гетерогенных структур на основе композитов с аморфной структурой гранул $\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}+N_2]\}_n$, $\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}+O_2]\}_n$, $\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$ и $\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$ были изготовлены по следующей технологии. В течение 47 секунд производилось напыление соответствующего композита в атмосфере аргона (t_1), затем 15 секунд в атмосфере аргона с добавлением кислорода или азота (t_2) при тех же условиях, что и для объемных композитов. Установление номинального давления реактивных газов ($P_{O_2(N_2)}$) после включения клапана натекателя составляло 4 секунды, их откачка при выключении клапана натекателя - 8 секунд. По скорости и времени напыления композитов были сделаны оценки толщины слоев многослойной структуры, которые составили для прослойки композитов, осажденных в атмосфере аргона $\sim 8\div 14$ нм, в атмосфере $Ar+O_2$ (N_2) $\sim 3\div 5$ нм. Индекс n в формуле многослойной структуры означает количество бислоев, реализованных в процессе напыления.

В результате были получены пленки аморфных нанокompозитов и многослойных структур на их основе, составы которых представлены в таблице.

Параметры получения композитов и многослойных структур

№ п/п	Партия	t_1, c	$P_{Ar} \times 10^{-4}, Torr$	t_2, c	$P_{Ar} \times 10^{-4}, Torr$	$P_{O_2} \times 10^{-4}, Torr$	n
1	$(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$	18000	6	-	-	-	1
2	$(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$	-	-	18000	6	0,2	1
3	$(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$	-	-	18000	6	0,24	1
4	$\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$	47	6	15	6	0,24	176
5	$\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$	47	6	15	6	0,32	178
6	$\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$	47	6	15	6	0,63	176
7	$\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$	47	6	15	6	1	176
8	$(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$	15000	8	-	-	-	1
9	$\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}+N_2]\}_n$	47	8	15	8	0,65	300
10	$\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}+O_2]\}_n$	47	8	15	8	0,2	300
11	$(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$	18000	9,2	-	-	-	1
12	$(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$	-	-	18000	9,2	0,32	1
13	$\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$	47	9,2	15	9,2	0,5	335
14	$\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$	47	9,2	15	9,2	1,4	290
15	$\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$	53	9,2	55	9,2	3,4	290

Элементный состав пленок определен с помощью энергодисперсионной рентгеновской приставки Oxford INCA Energy 250 на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380 LV.

Структурные особенности гетерогенных пленок исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ) в центре коллективного пользования Белгородского государственного университета. Магнитные свойства измерены с помощью вибрационного магнетометра. Измерение комплексной магнитной проницаемости композитов проводилось «измерителем добротности Е4-11» резонансным методом на частоте 50 МГц.

3. Структура композитов

Анализ результатов исследования структуры композитов показал, что в зависимости от состава композита структурная неоднородность может быть выражена в большей или меньшей степени. Так в случае композита $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_{60}(SiO_2)_{40}$ можно выделить слабо выраженную анизотропию распределения металлических гранул в направлении роста пленки (рис. 1а). Наиболее выраженная структурная анизотропия характерна для композита $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_{65}(SiO_2)_{35}$, структуру пленки которого в направлении роста можно определить, как «столбчатую» (рис. 1б).

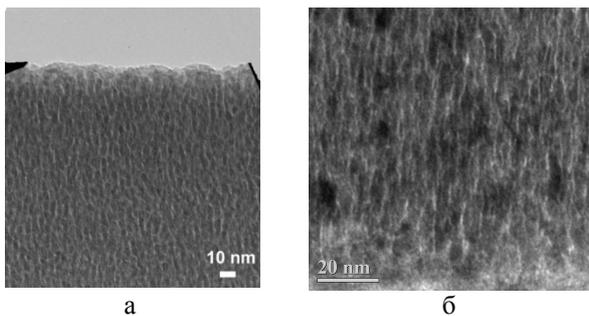


Рис. 1. Микрофотографии поперечного разреза пленок наногранулированных композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$ (а) и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ (б)

В плоскости пленки исследования просвечивающей электронной микроскопии не выявили существенной анизотропии гетерогенной структуры. Например, для композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{52}(\text{SiO}_2)_{48}$ металлические гранулы, размер которых составляет 6-7 нм, хаотически распределены в плоскости образца (рис. 2). Гало на электронограмме свидетельствует о том, что структура ферромагнитных гранул аморфная.

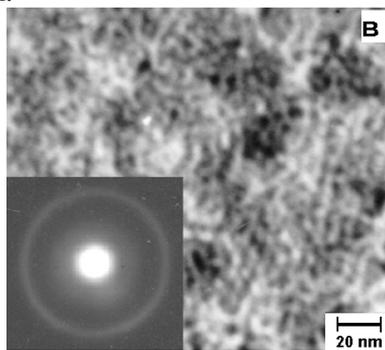


Рис. 2. Микрофотография и электронограмма гранулированного композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{52}(\text{SiO}_2)_{48}$

Микрофотография поперечного сечения пленки многослойной гетерогенной структуры $\{[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}]/[(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40} + \text{O}_2]\}_{176}$, показывает наличие наноразмерных параллельных плоскости пленки слоев, наличие которых существенно затрудняет образование цепочек гранул, выстроенных перпендикулярно поверхности подложки (рис. 3).

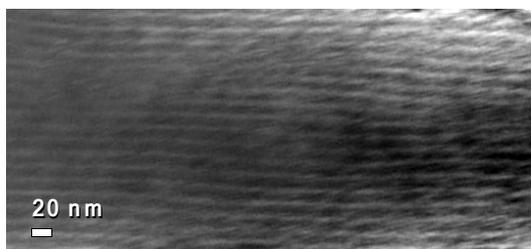


Рис. 3. Микрофотография поперечного разреза пленки многослойной гетерогенной структуры $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40} + \text{O}_2]\}_{176}$, полученной при циклическом напылении в атмосфере Ag с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр в течение 47 сек и смешанной атмосфере (Ag с давлением $6 \cdot 10^{-4}$ Торр и O_2 с давлением $2,4 \cdot 10^{-5}$ Торр) в течение 15 сек

4. Высокочастотные магнитные свойства

Исследования магнитных свойств объемных композитов показали, что они в существенной степени зависят от состава пленок. На рис. 4 представлены кривые намагниченности композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$, $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}$, и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$. Несмотря на близкую концентрацию аморфной ферромагнитной фазы данных композитов, кривые намагничивания заметно различаются. Пленка $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ имеет низкое значение коэрцитивной силы ($H_C \approx 4$ Э) и поле выхода кривой намагничивания в насыщение ($H_{\text{ВН}} \sim 30$ Э) (рис.4, кривая 1).

В тоже время композиционные пленки $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}$ и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ характеризуются сопоставимыми значениями коэрцитивного поля и более высокими значениями поля выхода кривой намагничивания в насыщение. Так для композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}$ и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ $H_C \approx 24$ Э и $H_{\text{ВН}} \sim 2000$ Э (кривые 2, 3). Однако в области низких магнитных полей ($H < 35$ Э) для пленок $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}$ (кривая 2) имеется участок с высокой магнитной проницаемостью, что свидетельствует о наличии азимутальной составляющей вектора намагниченности относительно плоскости пленки.

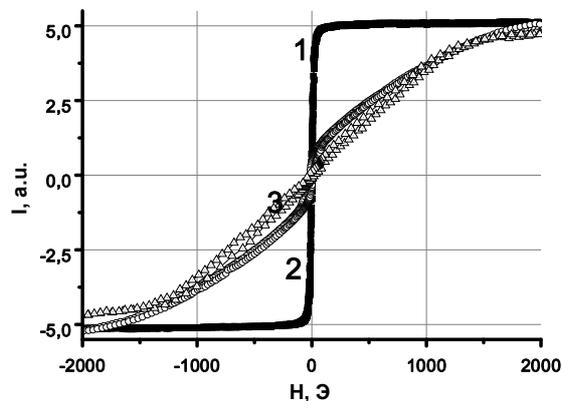


Рис. 4. Кривые намагничивания в плоскости пленки композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ (1), $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}$ (2), и $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ (3)

Влияние магнитной структуры на концентрационные зависимости действительной (μ') и мнимой (μ'') частей комплексной магнитной проницаемости нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ и $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ представлено на рис. 5. Анализ полученных зависимостей показал, что после порога перколяции величина μ' хорошо соотносится с наличием перпендикулярной составляющей намагниченности в пленках. Для композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ $\mu' \sim 400$ в концентрационном диапазоне 50÷70 ат. % (рис. 5с), композиты $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ имеют значения μ' порядка 60 (рис. 5 б), а в композитах $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ значения магнитной проницаемости не достигают и 20 единиц (рис. 5а).

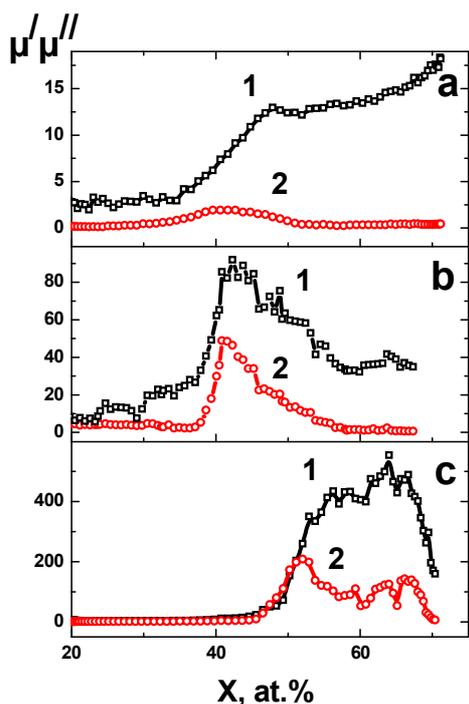


Рис. 5. Концентрационные зависимости действительной (кривая 1) и мнимой (кривая 2) частей комплексной магнитной проницаемости, измеренные на частоте 50 МГц, для нанокompозитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ (a), $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ (b) и $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ (c)

Введение окисленной прослойки в исследованные композиты оказывает влияние на магнитные свойства в зависимости от состава многослойной структуры. В случае объемных композиционных пленок $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ наличие окисленных прослоек не оказывает сильного влияния на магнитную структуру образцов (рис. 6). Однако стоит заметить, что введение композиционной прослойки несколько увеличивает коэрцитивную силу многослойных структур на основе композита $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$.

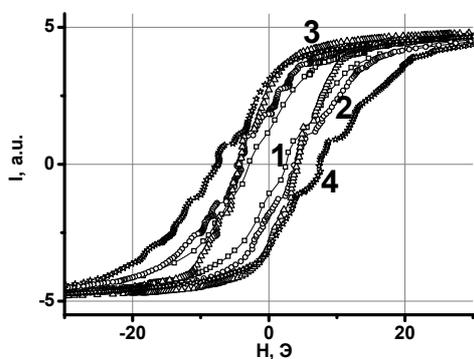


Рис. 6. Кривые намагничивания композитов и многослойных структур на основе композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$. Кривые на рисунке соответствуют составам, приведенным в таблице: 1 - № 1, 2 - № 3, 3 - № 4, 4 - № 7

При этом, введение окисленных прослоек привело к увеличению значений комплексной магнитной проницаемости композитов $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ (рис.7), что может быть связано с уменьшением перпендикулярной структурной неоднородности, выявленной при анализе микрофотографии поперечного разреза пленки $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_{60}(\text{SiO}_2)_{40}$ (рис. 1a).

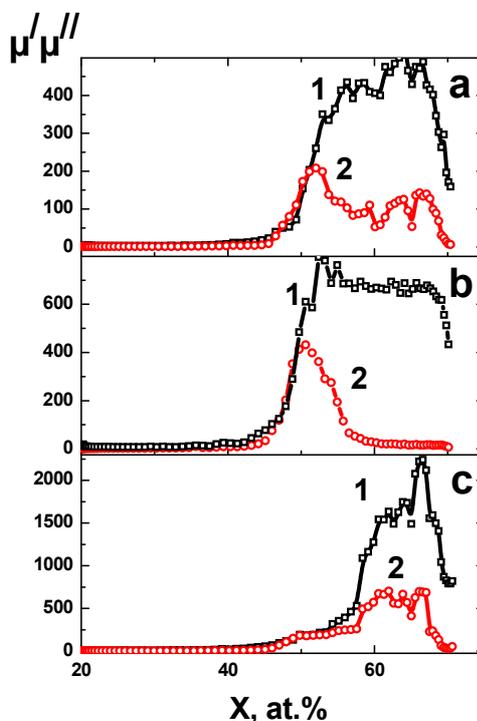


Рис. 7. Концентрационные зависимости действительной (кривая 1) и мнимой (кривая 2) частей комплексной магнитной проницаемости, измеренные на частоте 50 МГц, для композитов и многослойных структур на основе системы $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$. Кривые на рисунке соответствуют составам, приведенным в таблице: а - № 3, б - № 4, с - № 7

Окисленные прослойки из композитов, синтезированных в среде с добавлением активных газов в многослойных структурах $\{[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}]/[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x} + \text{O}_2]\}_n$ также не оказывают существенного влияния на магнитные свойства. В качестве примера представлены кривые намагничивания пленок композита $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$ и многослойных структур $\{[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}]/[(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35} + \text{O}_2]\}$ с различным парциальным давлением кислорода (рис.8). Несколько более низкое поле выхода кривой намагничивания в насыщение обнаружено при давлении кислорода $3,4 \cdot 10^{-4}$ Торр, что составляет более 30 пар. % от общего давления рабочего газа (рис. 6, кривая 5). Из анализа кривых намагничивания (рис. 8) и зависимостей $\mu'(x)$ и $\mu''(x)$ (рис. 9) для пленок композитов и многослойных структур на основе композитов $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ можно заключить, что добавление окисленных прослоек в данном случае не приводит к подавлению столбчатой структуры

пленок. Высокая концентрация реактивного газа сдвигает область роста магнитной проницаемости в сторону больших значений x (рис. 9с).

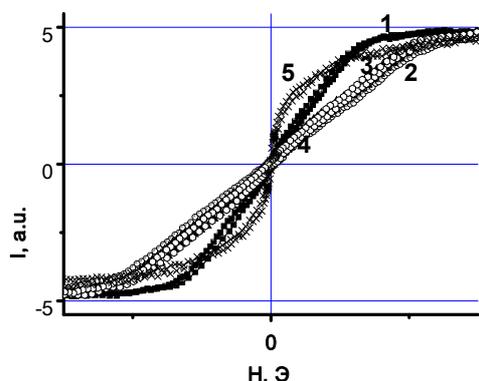


Рис. 8. Кривые намагничивания композитов и многослойных структур на основе системы $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_{65}(\text{SiO}_2)_{35}$. Кривые на рисунке соответствуют составам, приведенным в таблице: 1 - № 11, 2 - № 12, 3 - № 13, 4 - № 14 и 5 - № 15

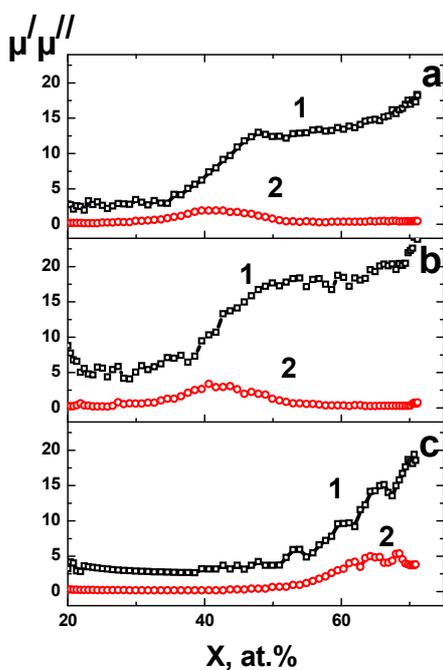


Рис. 9. Концентрационные зависимости действительной (кривая 1) и мнимой (кривая 2) частей комплексной магнитной проницаемости, измеренные на частоте 50 МГц, для композитов и многослойных структур на основе системы $(\text{Co}_{84}\text{Nb}_{14}\text{Ta}_2)_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$. Кривые на рисунке соответствуют составам, приведенным в таблице: а - № 11, б - № 13, с - № 15

Наиболее сильное влияние прослойки окисленного (азотированного) композита на изменение магнитных свойств проявилось в случае многослойных структур на основе композитов $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ в составах, находящихся после порога перколяции. Если в объемном композите $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}$ поле выхода кривой намагничивания в насыщение $H_{\text{ВН}} \sim 30$ Э (кривая 1 на рис. 10), то введение прослоек из пленок, синтезированных в атмосфере азота или

кислорода в многослойных структурах $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40} + \text{N}_2]\}_{300}$ и $\{[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}]/[(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40} + \text{O}_2]\}_{300}$ кардинально изменяет кривые намагничивания (рис. 10, кривые 2 и 3 соответственно).

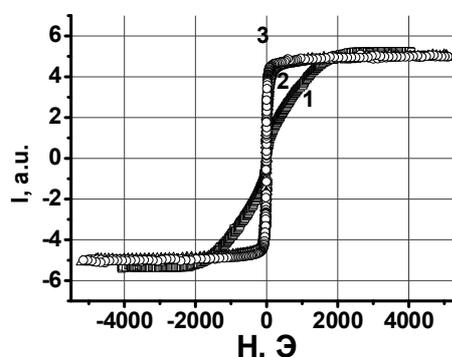


Рис. 10. Кривые намагничивания композитов и многослойных структур на основе системы $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_{60}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{40}$. Кривые на рисунке соответствуют составам, приведенным в таблице: 1 - № 8, 2 - № 9, 3 - № 10

В данном случае подавление перпендикулярной составляющей поля анизотропии привело к увеличению значений комплексной магнитной проницаемости для составов за порогом перколяции в 5 раз (рис. 11).

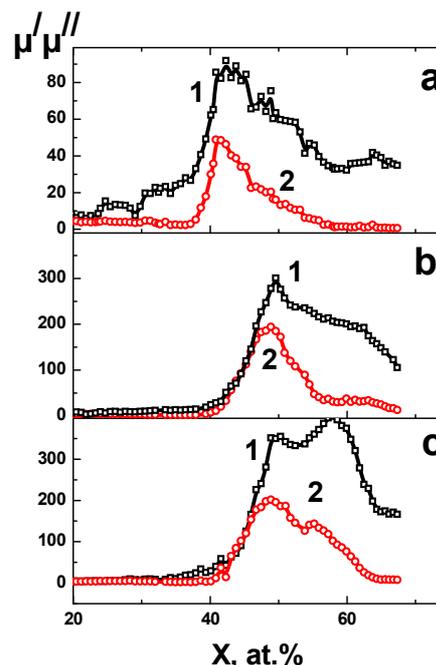


Рис. 11. Концентрационные зависимости действительной (кривая 1) и мнимой (кривая 2) частей комплексной магнитной проницаемости, измеренные на частоте 50 МГц, для композитов и многослойных структур на основе системы $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$. Кривые на рисунке соответствуют составам, приведенным в таблице: а - № 8, б - № 9, с - № 10

5. Обсуждение результатов

На высокочастотные свойства композитов определяющее влияние оказывает структура

гетерогенной системы. Для объяснения полученных результатов оказывается полезным рассмотреть трансформацию топологии структуры композитов с увеличением концентрации металлической фазы, выделить ряд областей с характерными структурными особенностями, в которых рассматривать изменения магнитных свойств. Для композитов с изотропным распределением частиц справедливы следующие представления. С уменьшением расстояния между ферромагнитными гранулами при приближении состава композита к порогу перколяции возрастает диполь-дипольное взаимодействие между ними. Учитывая при этом возможность образования кластеров из соприкасающихся частиц, следует ожидать роста энергии такого магнитного взаимодействия. Время разрушения магнитной упорядоченности после процесса намагничивания (время релаксации) уменьшается и при некоторой концентрации металлической фазы совпадает с характеристическим временем измерения. В этом концентрационном диапазоне наблюдается максимум тангенса магнитных потерь, имеющий релаксационную природу.

Когда энергия диполь-дипольного взаимодействия становится больше kT , где T температура измерений, гетерогенная система переходит в магнитоупорядоченное состояние. При этом отдельные частицы могут иметь собственные направления полей локальной анизотропии, обусловленные различными механизмами (формой частиц, направлением кристаллографических осей, упорядочением пар атомов в отдельной грануле, величиной и направлением локальных напряжений на границе диэлектрик - магнитострикционная ферромагнитная частица), что приводит к значительной дисперсии полей анизотропии пленки.

Дальнейшее увеличение доли ферромагнитной фазы приводит к формированию бесконечной сетки соприкасающихся металлических частиц и, как следствие, усилению вклада обменного взаимодействия между магнитными моментами атомов соседних контактирующих гранул. Такие структурные изменения приводят к уменьшению дисперсии локальных осей анизотропии относительно области с меньшей концентрацией металлической фазы, хотя величина магнитной неоднородности за счет наличия отдельных гранул не связанных обменным взаимодействием с формирующейся проводящей металлической сеткой остается значительной. Это приводит к росту действительной части комплексной магнитной проницаемости (μ'), но из-за дисперсии локальных полей анизотропии наблюдаются высокие значения магнитных потерь при высокочастотном перемагничивании в данной концентрационной области композита.

В области значительных концентраций металлической фазы композит можно рассматривать как объемный материал с наноразмерными включениями диэлектрика. В такой структуре дисперсия локальных полей анизотропии будет

невысокой и величина мнимой части комплексной магнитной проницаемости имеет небольшие значения.

Гетерогенные системы, которые имеют значительную перпендикулярную анизотропию, после порога перколяции имеют низкие значения комплексной магнитной проницаемости. Однако, как и в гомогенных композитах, на зависимостях $\mu''(x)$ наблюдается доперколяционный релаксационный максимум и величина $\mu''(x)$ увеличивается в данном концентрационном диапазоне.

Исходя из данных представлений и исследований магнитоэлектрических свойств композитов и многослойных гетерогенных структур на их основе можно объяснить концентрационные зависимости μ' и μ'' , представленные в данной работе.

Введение окисленного композиционного слоя в композиты $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$ повышает значения комплексной магнитной проницаемости для концентрации металлической фазы после порога перколяции за счет увеличения гомогенности расположения ферромагнитных наночастиц (рис. 7). Для композитов $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$ подобный технологический прием оказался малоэффективен и удается лишь сместить порог перколяции многослойной пленки $\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_{290}$ в сторону больших значений x за счет частичного окисления композитов $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$, осажденных без подачи кислорода (рис. 9с). В случае композитов $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ представленная в данной работе технология осаждения позволила подавить перпендикулярную составляющую магнитной анизотропии и повысить магнитную проницаемость пленок в 5 раз.

6. Заключение

Методом ионно-лучевого распыления составной мишени при циклическом напуске в инертный рабочий газ (Ar) активных газов (O_2 или N_2) получены новые многослойные пленочные структуры $\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}+N_2]\}_n$, $\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}+O_2]\}_n$, $\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$ и $\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$. Введение окисленной прослойки позволило подавить перпендикулярную магнитную анизотропию в композитах $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ при концентрации металлической фазы выше порога перколяции.

Литература

1. Судзуки К. Амorfные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. - М.: Металлургия, 1987. - 328 с.
2. Золотухин И В. Амorfные металлические сплавы / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин // УФН, 1990. - Т.160. - № 9. - С. 75 - 110.

3. Глезер А.М. Структура аморфных сплавов / А.М. Глезер, Б.В. Молотилов // ФММ. - 1990. Т.69. - №2. - С.5-28.
4. Кекало И.Б. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами / И.Б. Кекало, Б.А. Самарин. - М.: Металлургия, 1989. - 496 с.
5. Помогайло А.Д. Наночастицы металлов в полимерах / Д. Помогайло, А.С. Розенберг, И.Е. Уфлянд, - М.: Химия, 2000. - 672 с.
6. Цурин В.А. Синтез, структура и магнитные свойства наночастиц железа и никеля, капсулированных в углерод / В.А. Цурин, А.Е. Ермаков, М.А. Уймин, А.А. Мысик, Н.Н. Щеголева, В.С. Гавико, В.В. Майков // ФТТ. - 2014. -Т. 56. - № 2. - С 287.
7. Ohnuma S. H. High-frequency magnetic properties in metal-nonmetal granular films (invited) / S. H. Ohnuma, H. Fujimori, S. Mitani, T. Masumoto // J. Appl. Phys.-1996. - Vol.79. - P. 5130-5136.
8. 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 $Ni_{75}Fe_{25}-SiO_2$ granular films // Phys. Stat. Sol. A.-2005.-V.202.-N.10.-P.2021-2027.
9. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. - 352 с.
10. Lutsev L.V. Dielectric and magnetic losses of microwave electromagnetic radiation in granular structures with ferromagnetic nanoparticles / L.V. Lutsev, N. E.Kazantseva, I.A Tchmutin, N.G. Ryvkina, Yu. E. Kalinin, A. V. Sitnikoff // J. Phys.: Condens. Matter. - 2003. - Vol. 15. - P. 3665-3672.
11. Стогней О.В. Анизотропия аморфных наногранулированных композитов $CoNbTa-SiO_n$ и $CoFeB-SiO_n$ / О.В. Стогней, А.В. Ситников // ФТТ. - 2010. -Т. 52. - С. 2356-2362.
12. Ohnuma H., Hono K., Onoder H., Ohnuma S., Fujimori H., Pedersen J.S. Microstructures and magnetic properties of Co-Al-O granular thin films // J. Appl. Phys.-2000. - V. 87. - № 2. - P. 817-823.
13. Ohnuma S., Fujimori H., Masumoto T., Xiong X. Y., Ping D. H., Hono K. FeCo-Zr-O nanogranular soft-magnetic thin films with a high magnetic flux density // Appl. Phys. Lett. - 2003. -V. 82. - № 6.- P. 946-948.
14. Ситников А.В. Магнитные свойства и особенности формирования структуры наногранулированных композитов металл-диэлектрик // Материаловедение. - 2010. - № 3. - С. 49-61.
15. Fedotova J., Kasiuk J., Przewoznik J., Kapusta Cz., Svito J., Kalinin Yu., Sitnikov A. Effect of oxid shells on magnetic and magnetotransport characteristics of oxidized FeCoZr nanogranules in Al_2O_3 // J. of Alloys and Compounds. - 2011. - V. 509. - P. 9869-9875.
16. Saad A.M., Mazanik A.V., Kalinin Yu.E., Fedotova J.A., Fedotov A.K., Wrotek S., Sitnikov A.V., Svito J. Structure and electrical properties of CoFeZr-Aluminium oxide nanocomposite films // Rev. Adv. Mater. Sci. - 2004. - V. 8. - P. 152-157.

Воронежский государственный технический университет

HIGH-FREQUENCY MAGNETIC PROPERTIES OF MULTILAYER HETEROGENEOUS FILMS BASED ON NANOCOMPOSITES FERROMAGNETIC METAL-INSULATOR

H.S.M. Al'Azzavi, K.G. Korolev, V.A. Makagonov, A.V. Sitnikov, O.S. Tarasova

The films of composites and multilayer heterogeneous structures composite-composite, were obtained by ion-beam sputtering method $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$, $(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}$, $(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$, $\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}+N_2]\}_n$, $\{[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}]/[(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}+O_2]\}_n$, $\{[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{41}Fe_{39}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$ and $\{[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}]/[(Co_{84}Nb_{14}Ta_2)_x(SiO_2)_{100-x}+O_2]\}_n$ with cyclic feeding reactive gases during the deposition. Effect of structure and properties of magnetostatic films on the concentration dependences of complex magnetic permeability of samples at a frequency of 50 MHz was investigated. It is shown that the introduction of the oxidized layer allowed to destroy the perpendicular magnetic anisotropy of the composite $(Co_{45}Fe_{45}Zr_{10})_x(Al_2O_3)_{100-x}$ with concentration of metallic phase above the percolation threshold

Key words: heterogeneous multilayer structures, composite, complex permeability, magnetization curves, ferromagnetic granules, high-frequency properties

РЕВЕРСИВНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИСТИРОЛА И ТИТАНАТА БАРИЯ

В.М. Аль Мандалави, Н.А. Емельянов, Т.Н. Короткова, Л.Н. Коротков

В интервале температур 20 – 185 °С изучены температурные зависимости линейной (ϵ) и нелинейной (ϵ_2) составляющих диэлектрического отклика матричного нанокомпозита на основе титаната бария и полистирола (0,3BaTiO₃ - 0,7PS. Состав указан в объемных долях). На кривых $\epsilon(T)$ и $\epsilon_2(T)$ наблюдаются аномалии - максимум и минимум соответственно - в окрестностях температуры $T_m \approx 100$ °С. Показано, что регистрируемый в исследованном материале нелинейный диэлектрический отклик не связан непосредственно с сегнетоэлектрическими свойствами частиц титаната бария. Обосновано предположение о том, что ответственным за нелинейный вклад в поляризацию является граничный слой полистирол – частица BaTiO₃

Ключевые слова: матричный нанокомпозит, модификация поверхности, нелинейный отклик

ВВЕДЕНИЕ

Полистирол (PS) – известный полимер, применяемый в электротехнике и электронике. Его диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 2,5$ практически не зависит от напряженности электрического поля. Расширить область применения полистирола можно, внедрив в него ультрадисперсные частицы титаната бария (BaTiO₃). Введение сегнетоэлектрика в полимер приводит к повышению диэлектрической проницаемости, которая может изменяться под действием электрического поля.

Цель данной работы - анализ нелинейного диэлектрического отклика в композиционном материале 0,3BaTiO₃ – 0,7PS, представляющем собой полимерную полистирольную матрицу, равномерно заполненную на 30 объемных % частицами титаната бария с размерами 20 – 100 нм.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Наночастицы титаната бария получали пероксидным методом, описанным в [1-3]. Для синтеза готовили водные растворы TiCl₄ и BaCl₂·2H₂O, которые в соотношении молярных концентраций 1:1 перемешивали в течение 1 часа. Затем добавляли водные растворы H₂O₂ (30%) и NH₄OH (22%) в молярном соотношении: BaCl₂·2H₂O:TiCl₄:H₂O₂:NH₄OH = 1:1:2,5:12 и тщательно перемешивали. Полученный осадок промывали дистиллированной водой для удаления ионов Cl⁻ и нейтрализации pH, после чего его высушивали в десикаторе около суток и прокаливали один час при температуре 700 °С в воздушной атмосфере [4].

Рентгенофазовый анализ, проведенный при комнатной температуре (Cu K_α излучение), показал образование двух модификаций титаната бария - тетрагональной и кубической. Средний размер частиц, определенный по методу Дебая - Шеррера [5] составил ≈ 30 нм.

Поверхность синтезированных частиц титаната бария модифицировалась группами –ОН и поверхностно-активным веществом - олеатом натрия C₁₇H₃₃COONa по методу, предложенному в [6, 7].

Модификация поверхности частиц BaTiO₃ происходила в 2 этапа. На первом этапе поверхность полученных наночастиц обогащалась гидроксильными ОН группами путем их кипячения в водном 33% растворе H₂O₂ в течение 4 часов. На втором 2 грамма гидроксированных наночастиц BaTiO₃ добавляли в 100 мл 0,5%-го водного раствора C₁₇H₃₃COONa и интенсивно перемешивали при температуре 90 °С в течение 3 часов.

Суспензию фильтровали и промывали дистиллированной водой для удаления несвязанного олеата натрия. Полученный материал сушили при температуре 100 °С около 10 часов.

Композиционные материалы на основе наночастиц BaTiO₃ с поверхностью, модифицированной олеатом натрия, в полимерной матрице полистирола (C₈H₈)_n были получены следующим образом. Гранулы полистирола растворяли в толуоле, затем вводили частицы BaTiO₃ с модифицированной поверхностью до достижения необходимого объемного соотношения титаната бария и полистирола, после чего диспергировали суспензию ультразвуковым воздействием с использованием установки ИЛ 100-6/1 (23,5 кГц, 300 Вт, 15 минут).

Затем суспензия наносилась на полированную поверхность, на которой после испарения растворителя формировалась пленка композиционного материала.

Электроды на поверхности пленки создавали путем нанесения серебряносодержащей пасты, кото-

Аль Мандалави Висам Мувафак – ВГТУ, аспирант, e-mail: wisamaljawari@yahoo.com
Емельянов Никита Александрович - КГУ, научный сотрудник, e-mail: nikitaemelianov1988@gmail.com
Короткова Татьяна Николаевна – ВИ МВД РФ, канд. физ.- мат. наук, доцент, e-mail: tn_korotkova@mail.ru
Коротков Леонид Николаевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: l_korotkov@mail.ru

Работа выполнена при частичной поддержке РФФ, проект № 14-12-00583

рую впоследствии высушивали при комнатной температуре. Измерения линейного и нелинейного диэлектрического отклика проводили с использованием измерителя E7-20 на частоте 100 кГц в присутствии электрического смещающего поля E , которое плавно изменялось в пределах от -23 до +23 кВ/см. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости измерялась в режиме медленного нагрева образца (≈ 2 С°/мин). Исследование реверсивной нелинейности проводили в условиях термостабилизации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости показана на рис. 1. Видно, что кривая $\epsilon(T)$ проходит через максимум при температуре $T_m \approx 100$ С°, которая приблизительно соответствует, как температуре сегнетоэлектрического фазового перехода в объемном титанате бария ($T_C \approx 120$ С° [8]), так и температуре стеклования полистирола ($T_g \approx 90-100$ С° [9, 10]).

Сравнивая результаты измерения ϵ с данными, представленными в работе [10] для чистого полистирола, отметим их различия:

1. Для чистого полимера ϵ убывает в интервале температур 20 – 150 С° с повышением температуры, тогда как в случае композита $0,3\text{BaTiO}_3 - 0,7\text{PS}$ ниже T_m имеет место возрастание ϵ .

2. Значение диэлектрической проницаемости композиционного материала приблизительно вдвое превосходит ϵ чистого полистирола.

Таким образом, наличие сегнетоэлектрических частиц BaTiO_3 в полимерной матрице обуславливает повышение диэлектрической проницаемости и приводит к появлению максимума на ее температурной зависимости.

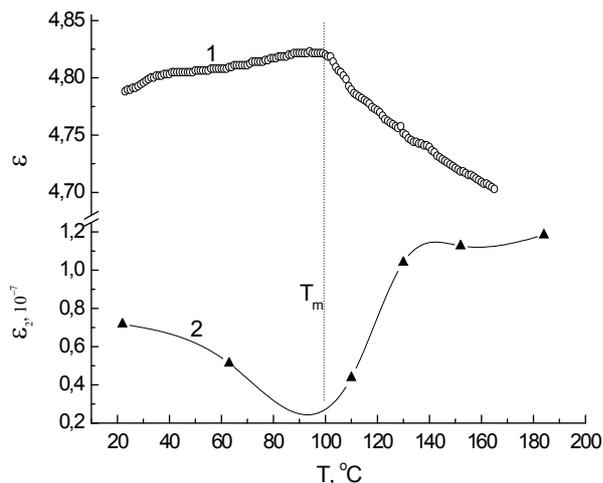


Рис. 1. Температурные зависимости линейной (1) и нелинейной (2) составляющих диэлектрической проницаемости

Характерной особенностью композиционного материала $0,3\text{BaTiO}_3 - 0,7\text{PS}$ является заметная нелинейность его диэлектрической проницаемости. Это проиллюстрировано на рис. 2, где показана за-

висимость ϵ от величины смещающего электрического поля E . Кривая $\epsilon(E)$ практически безгистерезисна и симметрична относительно оси ординат. Можно убедиться, что она удовлетворительно описывается формулой

$$\epsilon(E) \approx \epsilon - \epsilon_2 E^2.$$

Действительно, зависимость ϵ от E^2 (рис. 3) представляет прямую линию, тангенс угла наклона которой численно равен ϵ_2 – нелинейной составляющей диэлектрического отклика.

Можно предположить, что диэлектрическая нелинейность вызвана нелинейной поляризацией сегнетоэлектрических включений. Вместе с тем, эксперимент показал, что заметная зависимость $\epsilon(E)$ наблюдается, как ниже, так и выше температуры Кюри ($T_C \approx 120$ С°) в массивном титанате бария (рис. 4). Это однозначно указывает на то, нелинейный диэлектрический отклик непосредственно не связан с сегнетоэлектрическими явлениями во внедренных частицах BaTiO_3 .

Косвенно в пользу этого заключения также говорит отсутствие характерного для сегнетоэлектрических кристаллов гистерезиса на электрополевых зависимостях ϵ , полученных в эксперименте.

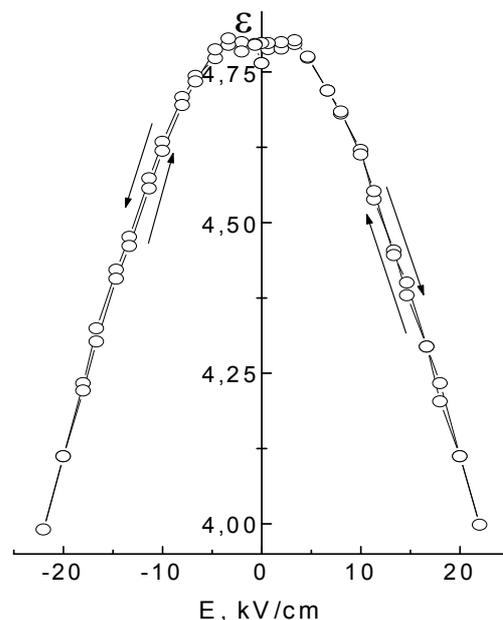


Рис. 2. Зависимость $\epsilon(E)$, наблюдаемая при комнатной температуре

Анализ кривых $\epsilon(E)$, представленных на рис. 4 показал, что все они могут быть удовлетворительно описаны приведенным выше соотношением. При этом нелинейная проницаемость ϵ_2 существенно изменяется с температурой (рис. 1). Данная зависимость не монотонна. Видно, что кривая $\epsilon_2(T)$ проходит через минимум в окрестностях T_m . Это совершенно противоположно тому, что имеет место в сегнетоэлектриках [8], для которых нелинейная со-

ставляющая диэлектрического отклика достигает наибольшей величины в точке, соответствующей максимуму ε .

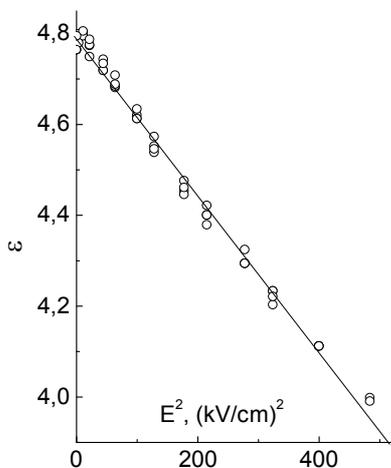


Рис. 3. Зависимость ε от E^2 при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$

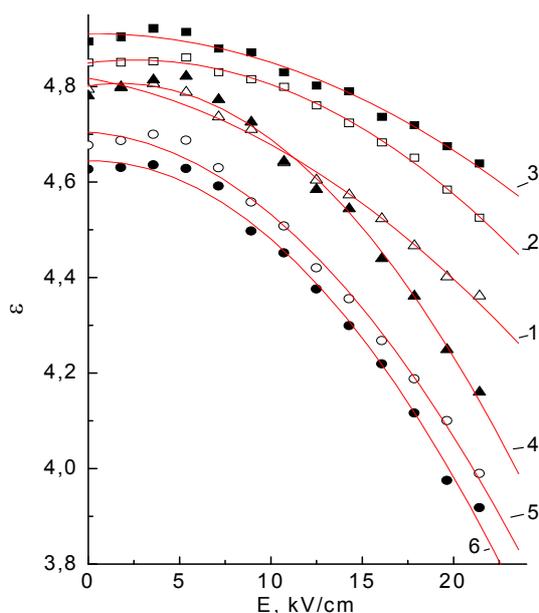


Рис. 4. Зависимость $\varepsilon(E)$, наблюдаемая при различных температурах: 22 (1), 63 (2), 110 (3), 130 (4), 152 (5) и 184 °C (6)

Таким образом, можно констатировать, что нелинейный диэлектрический отклик в исследуемом нанокompозите не связан с сегнетоэлектрическими свойствами частиц титаната бария. Это существенно отличает данный материал от аналогичных композитов, в которых частицы BaTiO_3 имеют характерные размеры порядка 10 мкм [11].

Поскольку второй компонент композиционного материала - полистирол является линейным диэлектриком, т.е. не может служить «источником нелинейности», то уместно предположить, что обнаруженная диэлектрическая нелинейность обусловлена

процессами поляризации в граничном слое полистирол – частица BaTiO_3 . Точных сведений о строении граничного слоя нет, вместе с тем из анализа ИК спектров [12,13] следует, что этот слой содержит молекулы олеата натрия и гидроксильные группы OH, которыми в ходе приготовления композита была модифицирована поверхность частиц титаната бария.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог работе, выделим ее основные результаты.

1. Значение диэлектрической проницаемости полученного композиционного материала приблизительно вдвое превосходит ε чистого полистирола.

2. Обнаружена сильная зависимость диэлектрической проницаемости от электрического поля. Относительное уменьшение ε под действием смещающего поля в условиях эксперимента составило около 20%.

3. Установлено, что ε убывает пропорционально квадрату приложенного поля, что указывает на то, что исследуемый материал макроскопически является centrosymmetric.

4. Показано, что наблюдаемый в композиционном материале нелинейный диэлектрический отклик не связан непосредственно с сегнетоэлектрическими свойствами частиц титаната бария. Обосновано предположение о том, что ответственным за нелинейный вклад в поляризацию является граничный слой полистирол – частица BaTiO_3 .

Литература

1. Pfaff G., Feltz A. On the Preparation and Sintering Behaviour of Barium Titanate // *Crystal Research & Technologies*. 1990. Vol. 25. Iss. 9. P. 1039–1047.
2. Genov, L., Maneva, M., and Parvanova, V., Synthesis and Thermal Decomposition of Barium Peroxotitanate to Barium Titanate // *Journal Thermal Analysis*. 1988. Vol. 33. P. 727–734.
3. Сидорчук, В.С., Халамейда С.В., Клименко В.П., Михеев В.А., Зажигалов В.А. Получение и свойства композиций BaTiO_3 /пористый оксид // *Неорганические материалы*. 2012. Том. 48. Вып. 9. С. 1046 – 1052.
4. Емельянов Н.А., Сизов А.С., Яковлев О.В. Структура и свойства наночастиц титаната бария, полученных термической обработкой пероксидного прекурсора // *Учёные записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета* 4(28) 2013 г. URL: <http://www.scientific-notes.ru/pdf/033-007>.
5. Скрышевский А.Ф. Структурный анализ жидкостей и аморфных тел. - М.: Высш. школа, 1980. - 328 с.
6. Li C.-C., Chang S.-J., Lee J.-T., Liao W.-S. Efficient hydroxylation of BaTiO_3 nanoparticles by using hydrogen peroxide // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010. Vol. 361. P.143–149.
7. Chang, S., Liao W., Lee J., Li C. An efficient approach to derive hydroxyl groups on the surface of barium titanate nanoparticles to improve its chemical modification

ability // Journal of Colloid and Interface Science. 2009. Vol. 329. P. 300–305.

8. Смоленский Г.А., Боков В.А., Исупов В.А. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики /Под ред. Г.А. Смоленского. - Л.: Наука. 1971. - 476 с.

9. Баргенов Г.М., Баргенова А.Г. Релаксационные свойства полимеров - М.: Химия. 1992. - 384 с.

10 Lupascu V., Huth H., Schick Ch., Wubbenhorst M. Specific heat and dielectric relaxations in ultra-thin polystyrene layers // Thermochemica Acta. 2005. Vol. 432. P. 222–228.

11. Robertson J. and Hall D.A. Nonlinear dielectric properties of particulate barium titanate–polymer composites //J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 4. P. 115407 (8 pp).

12. Dang Z.-M., Lin Y.-Q., Xu H.-P., Shi C.-Y., Li S.-T., Bai J. Fabrication and Dielectric Characterization of Advanced BaTiO₃/Polyimide Nanocomposite Films with High Thermal Stability // Advanced Functional Materials. 2008. Vol. 18. Iss. 10. P. 1509–1517.

Воронежский государственный технический университет
Воронежский институт МВД России
Курский государственный университет

REVERSIVE DIELECTRIC NONLINEARITY OF BARIUM TITANATE – POLYSTYRENE COMPOSITE MATERIAL

W.M. Al Mandalawi, N.A. Emelianov, T.N. Korotkova, L.N. Korotkov

Temperature dependences of linear (ϵ) and nonlinear (ϵ_2) components of dielectric response of matrix composite 0,3BaTiO₃ - 0,7PS (the composition is specified in volume parts) are studied. Anomalies in the curves $\epsilon(T)$ and $\epsilon_2(T)$ – maximum and minimum, correspondingly, are observed near the temperature $T_m \approx 100$ °C. It is revealed that nonlinear dielectric response is no caused by ferroelectric properties of barium titanate particles directly. Supposition concerning a main contribution of intermediate layer between BaTiO₃ and polystyrene to nonlinear polarization is proved

Key words: mixed nanocomposite, surface modification, nonlinear response

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА МАТРИЦЫ НА МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОГРАНУЛИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ Fe-Al-O и Fe-Nb-O

О.В. Стогней, А.Дж. Аль-Малики, А.А. Гребенников,
К.И. Семенов, А.Н. Смирнов

Исследовано влияние материала изолирующей матрицы на электрические и магнитные свойства нанокomпозитов металл-диэлектрик ($\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$) и металл-полупроводник ($\text{Fe}_x(\text{Nb}_2\text{O}_5)_{100-x}$). Установлено, что характеристики композитов, определяемые электронным транспортом через матрицу (электросопротивление, положение электрического порога перколяции, магниторезистивный эффект), зависят от вида материала. Замена матрицы из Al_2O_3 на Nb_2O_5 приводит к исчезновению магнитосопротивления и смещению порога перколяции с 53 до 14 ат. % Fe. При этом магнитные свойства композитов не зависят от вида матрицы: концентрация магнитного порога перколяции практически не меняется (50 и 48 ат. % Fe соответственно), а максимальная коэрцитивная сила образцов, находящихся «за» порогом перколяции, близка по величине (14 Э и 44 Э) в композитах $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ и $\text{Fe}_x(\text{Nb}_2\text{O}_5)_{100-x}$ соответственно

Ключевые слова: гранулированный нанокomпозит, порог перколяции, магнитосопротивление

Введение

Перенос заряда через доперколяционные композиты металл-диэлектрик во многом определяется свойствами изолирующей матрицы. В частности, он зависит от степени дефектности диэлектрика (поскольку это влияет на прыжковую проводимость) [1,2] и от ширины запрещенной зоны (поскольку это влияет на вероятность туннелирования электронов между гранулами) [3]. Отсюда следует, что те свойства композитов, которые связаны с движением электронов (электропроводность, магнитосопротивление, термоЭДС и т.д.), должны в значительной степени зависеть от типа матрицы. Практически все известные композиты сформированы на основе оксидных или фторидных матриц, являющихся диэлектриками с большой шириной запрещенной зоны (от 6 – 8 эВ для оксидов и до 12 эВ в случае CaF_2 [4]). Вместе с тем, представляет интерес получение и исследование композитов, в которых ширина запрещенной зоны изолирующей матрицы была бы соизмерима со значениями, характерными для полупроводников. В данной работе проведен синтез композиционных образцов с полупроводниковой матрицей, сформированной из оксида ниобия, а также проведено сравнительное исследование двух композитных систем с одинаковой металлической фазой (железо), но различными изолирующими матрицами: оксид ниобия (полупроводник) и оксид алюминия (диэлектрик).

Методика получения образцов

Оксид алюминия (как и оксид кремния) является наиболее часто используемым диэлектриком при

формировании композитов металл-диэлектрик [1]. Ширина запрещенной зоны в Al_2O_3 порядка 6 эВ (по разным данным от 6.2 эВ [5] до 6,5-9,5 эВ) [6]). Этот факт, а также то, что алюминий чрезвычайно активно взаимодействует с кислородом, позволяет легко формировать композитные системы с 3d-металлами. Использование обычных полупроводников (Si, Ge и т.п.) в качестве изолирующей матрицы композитов весьма проблематично, поскольку при совместном осаждении атомов полупроводника и металла происходит формирование гомогенной структуры, а не композитной. В связи с этим в данной работе в качестве изолирующей матрицы был выбран оксидный полупроводник – оксид ниобия. Оксид ниобия является полупроводником, причем, в зависимости от степени окисления ниобия ширина запрещенной зоны меняется достаточно сильно. Так в Nb_2O_5 ширина запрещенной зоны 1,65 эВ, в NbO_2 ширина запрещенной зоны 0,26 эВ, и, наконец, монооксид ниобия NbO обладает металлической проводимостью, $\rho=10^{-5}$ Ом·см [7]. Исходя из этого, навески на составную мишень, предназначенную для распыления, были изготовлены из Nb_2O_5 .

Одним из основных критериев при выборе компонент для формирования композитных систем является определенное соотношение стандартных энергий образования Гиббса (ΔG°) для оксидов элемента, формирующего диэлектрическую фазу, и элемента, формирующего ферромагнитную фазу. Очевидно, что в нашем случае ΔG° оксида железа должна быть гораздо меньше по модулю, чем ΔG° оксида ниобия или оксида алюминия. В этом случае, при поатомной конденсации материала на поверхность подложки, совместно с атомами кислорода, в первую очередь, будут взаимодействовать атомы алюминия или ниобия, что обеспечит создание гетерогенной (двухфазной) структуры. Это условие выполняется в полной мере для выбранных компонент,

Стогней Олег Владимирович - ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: sto@sci.vrn.ru

Аль-Малики Ахмед Джасем - ВГТУ, аспирант, e-mail: ahmed.jasem@mail.ru

Гребенников Антон Александрович - ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, e-mail: anton18885@yandex.ru

Семенов Константин Иванович - ВГТУ, аспирант, e-mail: konst1990i@ya.ru

Смирнов Андрей Николаевич - ВГТУ, студент, e-mail: deadpunk@inbox.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 15-02-05920

поскольку $\Delta G^{\circ}_{\text{FeO}} = -244.3$ кДж/моль, $\Delta G^{\circ}_{\text{Al}_2\text{O}_3} = -1582$ кДж/моль и $\Delta G^{\circ}_{\text{Nb}_2\text{O}_5} = -1764.1$ кДж/моль, соответственно [8]. Если учитывать только этот критерий, то оксид ниобия является даже более предпочтительным для образования композитной системы с никелем, нежели алюминий.

Все композиты были получены в виде тонких пленок методом ионно-лучевого распыления составной мишени в атмосфере аргона. Для распыления использовалась составная мишень с несимметричным размещением диэлектрических навесок (Al_2O_3 или Nb_2O_5) на металлической основе, что дало возможность получить в одном процессе напыления большое число образцов с различной концентрацией железа. Пленки осаждалась на ситалловые (СТ-50) подложки. Толщина образцов измерялась с помощью интерферометра МИИ-4 и составляла ~ 4 мкм. Измерение концентрации химических элементов (Fe, Al и Nb), входящих в состав образцов, проводилось методом электронно-зондового рентгено-спектрального микроанализа на сканирующем рентгеновском микроанализаторе JXA-840 с погрешностью, не превышающей 1.5 % от содержания измеряемого элемента.

Электрические и магниторезистивные свойства композитов исследовались двухзондовым потенциометрическим методом. Для измерения использовался универсальный вольтметр В7-78/1. Термические отжиги образцов проводились в вакуумной камере при остаточном давлении $4 \cdot 10^{-3}$ Па. Процессы намагничивания изучались с помощью вибрационного магнетометра.

Результаты и обсуждение

1. Композиты системы $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$

На рис. 1 показана концентрационная зависимость электросопротивления композитов $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$. Данная зависимость характерна для композитных систем, в которых электрическое сопротивление меняется на несколько порядков при увеличении концентрации металлической фазы. Используя методику, описанную в [9] был определен порог перколяции в напыленных композитах

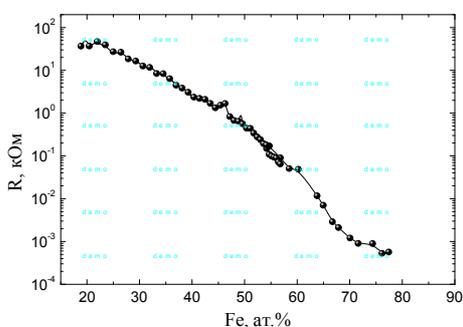


Рис. 1. Концентрационная зависимость электрического сопротивления композитов $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$, находящихся в исходном состоянии

$\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$. Для этого проводился двадцатиминутный отжиг композитных образцов в вакууме при температуре 300 °С. После отжига сопротивление образцов измерялось и сопоставлялось со значениями, которые были получены от образцов, находящихся в исходном состоянии (рис. 2). Очевидно, что сопротивление образцов, подвергнутых отжигам, меняется по-разному относительно исходных значений. В образцах с небольшим содержанием металлической фазы (менее 52 ат. % Fe) сопротивление возросло, а в образцах с большим содержанием железа (более 54 ат. % Fe) – напротив снизилось.

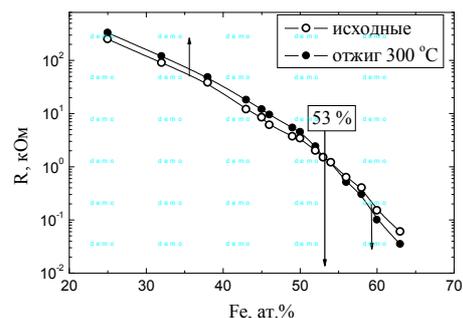


Рис. 2. Концентрационные зависимости электросопротивления исходных и отожженных при 300 °С композитов $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$. Концентрация порога перколяции показана на рисунке в ат. % железа

Наблюдаемые изменения связаны с уменьшением в процессе отжига дефектности структуры композитных материалов [9, 10]. В образцах доперколяционной области электроперенос частично осуществляется путем туннелирования электронов из гранулы в гранулу через локализованные состояния в диэлектрической матрице, существование которых обусловлено наличием в структуре разного рода несовершенств. Уменьшение числа дефектов приводит к снижению числа локализованных состояний, вследствие чего интенсивность туннелирования электронов уменьшается и сопротивление материала возрастает. С другой стороны, в композитах, расположенных за порогом перколяции, отжики приводят к рекристаллизации металлической фазы (которая в данном случае выступает в роли сплошной проводящей матрицы), уменьшению центров рассеяния и снижению электрического сопротивления [10]. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что порог перколяции в композитной системе $\text{Fe}_x(\text{Al}_2\text{O}_n)_{100-x}$ находится в области концентраций 52-54 ат. % Fe.

Характерной особенностью гранулированных нанокompозитов ферромагнитный металл – диэлектрик доперколяционного состава является наличие туннельного магниторезистивного эффекта. Его проявление обусловлено особенностью морфологии таких систем и связано со спин-зависимым туннелированием электронов между гранулами через потенциальный барьер, создаваемый диэлектриком [3,9]. Туннельный магниторезистивный эффект наблюдается в доперколяционных нанокompозитах

независимо от метода получения или элементного состава ферромагнитной и диэлектрической фаз.

Установлено, что исследуемые композитные образцы $Fe_x(AlO)_{100-x}$, находящиеся до порога перколяции, проявляют отрицательное магнитосопротивление (МС). Концентрационная зависимость величины МС типична для композитов металл-диэлектрик и обусловлена морфологическими изменениями структуры при изменении содержания в ней ферромагнитной фазы.

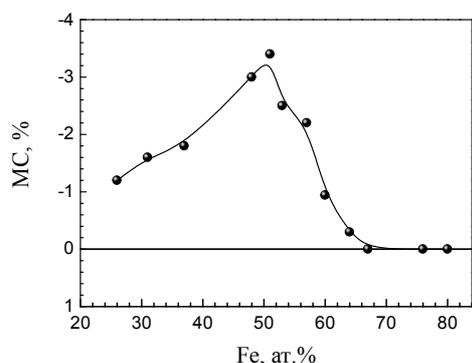


Рис. 3. Концентрационная зависимость магниторезистивного эффекта образцов композитов $Fe_x(AlO)_{100-x}$

В доперколяционной области с увеличением концентрации ферромагнитной фазы магнитосопротивление возрастает (22 – 52 ат. % Fe). Как известно, проявление изотропного отрицательного магнитосопротивления обусловлено спин-зависимым туннелированием электронов между изолированными в матрице гранулами ферромагнетика [3,9,10]. Интенсивность этого процесса зависит, в частности, от ширины преодолеваемого электронами энергетического барьера, которая зависит от расстояния между металлическими гранулами. Увеличение содержания металла в образце приводит к укрупнению зерен и, соответственно, к уменьшению расстояния между ними, поэтому магнитосопротивление возрастает. Максимум величины МС наблюдается при некоторой пороговой концентрации железа, когда зерна ферромагнетика отделены друг от друга диэлектрической прослойкой минимальной толщины, которой, тем не менее, достаточно для того, чтобы между гранулами не возникло обменное взаимодействие (49 – 52 ат. % Fe). Дальнейшее увеличение содержания металлической фазы в композитах обычно приводит к появлению ферромагнитного упорядочения магнитных моментов гранул и снижению магнитосопротивления до нуля. В нашем случае, наблюдается именно такая картина, при превышении концентрации железа 52 ат. % величина магнитосопротивления резко уменьшается по величине (рис. 3).

Изменение магнитных свойств композитов $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$, происходящее при увеличении концентрации железа, хорошо согласуется с концентрационной зависимостью магниторезистивного эффекта. Доперколяционные композиты проявляют суперпарамагнитные свойства: коэрцитивная сила отсутствует, а выход образцов в состояние магнит-

ного насыщения происходит в полях большой напряженности (значительно больше, чем 4 кЭ). На рис. 4 зависимости, характерные для суперпарамагнитных материалов, приведены для образца, содержащего 43 ат. % железа. В композитах, находящихся на пороге перколяции (51 и 53 ат. % Fe), начинает проявляться макроскопическая коэрцитивность (5 и 9 Э, соответственно), что обусловлено появлением скоррелированности между магнитными моментами соседних гранул. Характерно, что магнитосопротивление композита с 53 ат. % Fe меньше, чем магнитосопротивление композита с 51 ат. % Fe (рис. 3), то есть возникновение магнитного упорядочения между соседними гранулами резко снижает величину магниторезистивного эффекта. Композиты $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$, расположенные за порогом перколяции, проявляют магнитные свойства, типичные для ферромагнитных материалов: наблюдается магнитный гистерезис, магнитное насыщение достигается в полях меньших 500 Э, значение намагниченности насыщения монотонно возрастает при увеличении концентрации железа (рис. 4)

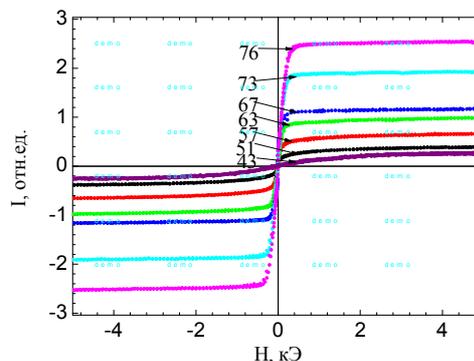


Рис. 4. Полевые зависимости намагниченности композитов $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$. Цифры у кривых обозначают содержание железа в ат. %

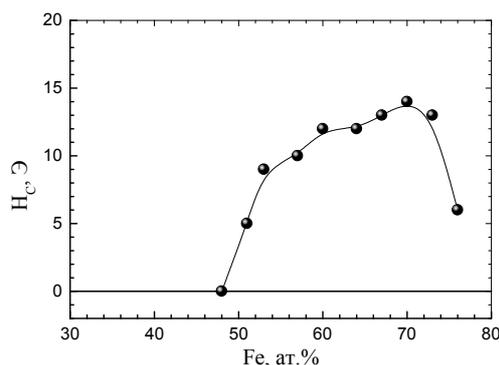


Рис. 5. Концентрационная зависимость коэрцитивной силы композитов $Fe_x(AlO)_{100-x}$

Концентрационная зависимость коэрцитивной силы композитов немонотонна (рис. 5), с максимумом в области 70 ат. % Fe. Такая немонотонная зависимость характерна для наноструктурных магнетиков, в которых происходит смена механизмов перемагничивания [11]. В интервале концентраций 51 – 70 ат. % Fe в образцах реализуется однодомное

состояние, возникающее вследствие малого размера металлических гранул и обусловленное стремлением системы к минимизации энергии [12]. Для перемангничивания таких однодоменных частиц необходимо преодолевать энергию анизотропии, которая пропорциональна их объему – отсюда и рост коэрцитивной силы при увеличении концентрации железа (увеличении размера гранул). При более высоком содержании железа металлические гранулы организуются в кластеры, которые в силу своих размеров могут «разбиваться» на домены. В таких композитах перемангничивание начинается за счет движения доменных стенок внутри кластеров и величина коэрцитивной силы будет определяться пиннингом стенок на структурных дефектах, преимущественно на границах зёрен, объединенных в кластеры. С увеличением концентрации металлической фазы размер зерен растет, что способствует снижению числа межзеренных границ, а значит уменьшению центров пиннинга в материале. Поэтому, при увеличении концентрации железа в образцах $Fe_x(Al_2O_n)_{100-x}$ (с 70 до 76 ат. % Fe, рис. 5) значения коэрцитивной силы резко уменьшаются. Формирование кластеров железа подтверждается также и тем, что при концентрации железа более 70 ат. % магниторезистивный эффект в образцах полностью исчезает (рис. 4).

Таким образом, композиты системы Fe-Al-O проявляют комплекс характеристик абсолютно типичных для наногранулированных систем ферромагнетик- диэлектрик: положение электрического и магнитного порогов перколяции практически совпадают по концентрации, величина туннельного МС в доперколяционной области варьируется от 1 % до 3,5 %, достигая максимума на пороге протекания. Дальнейшие исследования показали, что замена диэлектрической матрицы из оксида алюминия на оксид ниобия приводит к значительным изменениям в свойствах композитной системы.

2. Композиты системы $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$

Образцы в системе Fe-Nb-O были получены в условиях абсолютно аналогичных тем, в которых были получены композиты системы Fe-Al-O, а близкие значения $\Delta G^o_{Al_2O_3}$ и $\Delta G^o_{Nb_2O_5}$ были серьезным аргументом в пользу того, что в системе Fe-Nb-O должна формироваться гранулированная структура. Концентрационная зависимость электрического сопротивления образцов $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$ как и в случае первой системы имеет вид характерный для композитов металл-диэлектрик, рис. 6. Однако определение положения электрического порога перколяции в соответствии с [9] показало, что в данной системе порог перколяции значительно смещен в область богатую оксидом ниобия и составляет 14 ат. %, в то время как в композитах $Fe_x(Al_2O_n)_{100-x}$ порог электрической перколяции составляет 53 ат. % Fe. Характерно, что несмотря на значительную разницу в концентрационном положении порога перколяции (53 и 14 ат. % Fe) абсолютное значение электросо-

противления композитов, расположенных на пороге перколяции, одинаково и составляет 1.6 и 1.8 кОм в композитах $Fe_{14}(Nb_2O_n)_{86}$ и $Fe_{53}(Al_2O_n)_{47}$, соответственно. Это то значение электросопротивления, которое соответствует электропереносу через «перколяционный кластер», то есть через конгломерат гранул, образовавших сплошной канал через весь объем образца. Сопротивление такого канала определяется, с одной стороны, свойствами материала, формирующего гранулы (в нашем случае он один и тот же), а с другой морфологией – то есть размером гранул, поскольку этот параметр определяет плотность межзёренных границ, на которых происходит рассеяние заряда, что, собственно, определяет величину сопротивления образцов. Равенство значений сопротивления у «перколяционных» образцов позволяет предполагать, что и размеры гранул в композитах двух систем одинаковы.

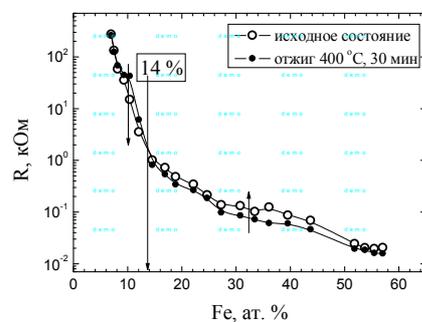


Рис. 6. Концентрационные зависимости электрического сопротивления исходных и отожженных при 400 °C композитов $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$. Концентрация порога перколяции показана на рисунке в ат. % железа

Существенным является вопрос о причине такого значительного смещения порога перколяции в область богатую оксидом ниобия. По всей видимости, это связано со значительной электрической проницаемостью матрицы из оксида ниобия, который, с одной стороны, является полупроводником, а с другой - имеет аморфную структуру (ранее было показано, что при напылении оксида ниобия в нем формируется аморфная структура [13]), что увеличивает его проводимость. Следствием этих особенностей является то, что перколяционный кластер в системе Fe-Nb-O возникает не тогда, когда происходит физический контакт металлических гранул друг с другом, как это имеет место в композитах системы Fe-Al-O, а при меньшей концентрации металла, то есть когда гранулы железа остаются разделенными оксидными прослойками (барьерами). Однако, поскольку проводимость этих оксидных барьеров высока – наблюдается электрическая перколяция. Фактически прослойки из оксида ниобия между металлическими гранулами оказываются проницаемы для электронов и не выполняют роль изолирующих барьеров, как это наблюдается в композитах системы Fe-Al-O.

Экспериментальным подтверждением данного предположения является отсутствие туннельного магниторезистивного эффекта в композитах

$Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$. Как известно, туннельное магнитосопротивление всегда проявляется в доперколяционных композитах ферромагнитный металл - диэлектрик, что связано со специфическим механизмом переноса заряда через гетерогенную среду, а именно, со спин-зависимым туннелированием электронов через диэлектрический барьер, разделяющий ферромагнитные гранулы, находящиеся в суперпарамагнитном состоянии [1-3,9,10]. Отсутствие магниторезистивного эффекта при характерной концентрационной зависимости сопротивления (рис. 6) подтверждает предположение о высокой электрической проницаемости барьеров из оксида ниобия.

Исследование магнитных свойств композитов $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$ согласуются со сделанными выше выводами. С точки зрения магнитных свойств композиты $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$ практически не отличаются от композитов системы Fe-Al-O. На рис. 7 и 8 показаны кривые перемагничивания и концентрационная зависимость коэрцитивной силы образцов $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$.

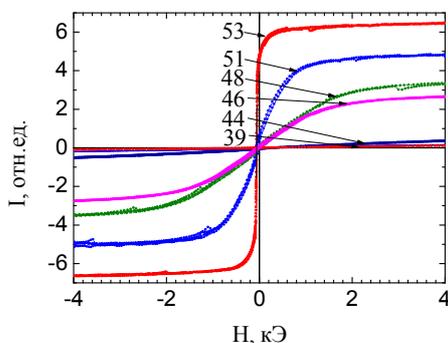


Рис. 7. Полевые зависимости намагниченности композитов $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$. Цифры у кривых обозначают содержания железа в ат. %

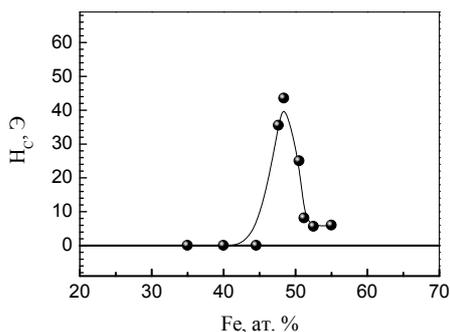


Рис. 8. Концентрационная зависимость коэрцитивной силы композитов $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что магнитный порог перколяции в композитах с матрицей из оксида ниобия составляет 47-48 ат. % Fe, что совершенно не совпадает с электрическим порогом перколяции (14 ат. % Fe, см. рис. 6). С другой стороны, он практически совпадает с концентрационным положением магнитного порога в композитах $Fe_x(Al_2O_n)_{100-x}$ (50 ат. % Fe, см. рис. 5). Кроме того, кривые перемагничивания для композитов $Fe_x(Nb_2O_n)_{100-x}$ с концентрацией железа менее 45 ат.

% имеют вид типичный для суперпарамагнитных материалов (отсутствие гистерезиса и насыщения в полях до 6 кЭ). Это говорит о том, что при концентрации железа менее 45 ат. % в образцах присутствуют гранулы, находящиеся в суперпарамагнитном состоянии – они ферромагнитны, но их магнитные моменты не коррелированы, а ориентация моментов флуктуирует случайным образом [1]. Это свидетельствует о том, что морфология композитов в системе Fe-Nb-O аналогична морфологии композитов системы Fe-Al-O, а отсутствие магниторезистивного эффекта и смещение порога перколяции в область богатую оксидом ниобия связано с полупроводниковыми свойствами матрицы.

Выводы

Замена диэлектрической матрицы (Al_2O_3) при формировании композитов на полупроводниковую (Nb_2O_3) приводит к значительному изменению физических свойств, определяемых электронным транспортом через композитную среду. В композитах $Fe_x(Nb_2O_5)_{100-x}$ электрический порог перколяции значительно смещен в область богатую оксидом ниобия (14 ат. % Fe), а магниторезистивный эффект полностью отсутствует.

Установлено, что магнитные свойства нанокompозитов не зависят от материала изолирующей матрицы. Концентрация магнитного порога перколяции в композитах $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ и $Fe_x(Nb_2O_5)_{100-x}$ практически не зависит от типа матрицы и определяется только содержанием ферромагнитной фазы (50 и 48 ат.% Fe, соответственно). Максимальные значения коэрцитивной силы образцов, находящихся «за» порогом перколяции, близки по величине (14 Э и 44 Э в композитах $Fe_x(Al_2O_3)_{100-x}$ и $Fe_x(Nb_2O_5)_{100-x}$, соответственно).

Литература

1. С.А.Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах // Москва: Бинوم. Лаборатория знаний. – 2012. – 352 с.
2. J.S.Mooodera, G.Mathon. Spin polarized tunneling in ferromagnetic junctions // JMMM. – 1999. - V.200/ - P.248-273.
3. B.Abeles, P. Sheng M.D.Coutts and Y. Arie. Structural and electrical properties of granular metal films // Advances in Physics.-1975.-V.24.-P.407-461.
4. В.С. Урусов. Теоретическая кристаллохимия // Москва: Изд-во МГУ. – 1987. - 275 с.
5. V.V. Afanas'ev, A. Stesmans, and W. Tsai. Determination of interface energy band diagram between (100)Si and mixed Al-Hf oxides using internal electron photoemission // Appl. Phys. Letters. - 2003. - V.82. - P. 245.
6. П. Кофстад. Отклонение от стехиометрии. Диффузия и электропроводность в простых окислах металлов // Москва: Мир. – 1975. - 399 с.
7. C.N.R. Rao, G.V. Rao. Transition metal oxides // Washington: National Standard reference system. – 1974. - 699 p.
8. В.А. Рабинович, З.Я. Халявин. Краткий химический справочник // Ленинград: Химия. – 1978. - 376 с.
9. И.В. Золотухин, О.В. Стогней. Физика наносистем: графены и гранулированные нанокompозиты // Во-

ронеж: Изд-во Воронежского Гос. Техн.Ун-та. – 2011. – 226 с.

10. O.V.Stognei, V.A Slyusarev, Yu.E. Kalinin, A.V. Sitnikov, M.N. Kopitin. Change of the electrical properties of granular CoFeB-SiO_n nanocomposites after heat treatment (2003) // *Microelectronic Engineering*, 2003. – V.9 (N.2-4) - P. 476-479.

11. G.Herzer. Grain size dependence of coercivity and permeability in nanocrystalline ferromagnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 1990. – V.26. – P.1397-1402.

12. X.Battle, A.Labarta. Finite-size effects in fine particles: magnetic and transport properties // *Journal of Phys. D: Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 35. – R 15 – 42.

13. К.И. Семенов, М.А. Каширин, О.В. Стогней. Технология тонких пленок Nb₂O₅ // «Физика твердого тела»: Тез. докл. 53-я Отчетная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, сотрудников, аспирантов и студентов. г. Воронеж, 24-25 апреля 2013 г. – С.23.

Воронежский государственный технический университет

EFFECT OF THE MATRIX MATERIAL ON THE MAGNETOTRANSPORT PROPERTIES OF Fe-Al-O AND Fe-Nb-O NANO GRANULAR COMPOSITES

O.V. Stognei, A.J. Al-Maliki, A.A. Grebennikov, K.I. Semenenko, A.N. Smirnov

Effect of material of an insulating matrix on the electrical and magnetic properties of metal-dielectric Fe_x(Al₂O₃)_{100-x} and metal-semiconductor Fe_x(Nb₂O₅)_{100-x} nanocomposites has been investigated. It was found that the composites characteristics which are defined by electron transport through the matrix (the electrical resistance, the position of the electrical percolation threshold, the magnetoresistive effect) depend on the type of material. Replacing the Al₂O_n matrix by Nb₂O_n leads to disappearance of the magnetoresistivity and shift of the percolation threshold from 53 to 14 at. % Fe. The magnetic properties of the composites does not depend on the type of the matrix: the concentration of the magnetic percolation threshold is not changed (50 and 48 at.% Fe, respectively) and the maximum coercive force values of the samples that are "after" percolation threshold are close in magnitude (14 Oe and 44 Oe) in composites Fe_x(Al₂O₃)_{100-x} and Fe_x(Nb₂O₅)_{100-x}, respectively

Key words: granular nanocomposite percolation threshold, magnetoresistance

НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛ И МЕЖГРАНУЛЬНОЙ СРЕДЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ СИСТЕМЫ Bi-Sr-Ca-Cu-O

И.М. Голев, А.В. Сергеев, В.Г. Кадменский, О.В. Калядин

Приведены результаты исследований нелинейных свойств гранулированных сверхпроводников системы Bi-Sr-Ca-Cu-O при сверхпроводящем переходе. Впервые обнаружено два максимума на температурной зависимости третьей гармоники сигнала отклика при воздействии переменного поля. Произведен расчет средней тепловой мощности омических потерь в случае сильного и слабого скин-эффекта. Показано, что третья гармоника несет информацию только об областях гранулированных высокотемпературных сверхпроводников, обладающих нелинейными свойствами

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, нелинейные свойства, скин-эффект, диссипация энергии, эффективная электрическая проводимость

В настоящее время достаточно подробно исследованы низкополевые электродинамические свойства гранулированных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) систем типа Y-Ba-Cu-O и Bi-Sr-Ca-Cu-O. Теоретический и практический интерес представляют исследования нелинейных свойств комплексной магнитной проницаемости и комплексной электрической проводимости при воздействии переменного магнитного поля частотой ω . При частоте внешнего магнитного поля ниже частоты распаривания куперовских пар (10^{11} Гц) и частоты проявления инерциальных свойств сверхпроводящих электронов (10^7 Гц), нелинейные явления обусловлены динамикой вихрей магнитного потока.

Исследования проводятся при воздействии на сверхпроводник таких внешних факторов как постоянное магнитное поле и температура. В первом случае рассматривается воздействие на сверхпроводник суперпозиции внешнего постоянного магнитного поля H_e и переменного магнитного поля $H_0 \ll H_e$ [1 - 4]. При значениях постоянного поля H_e , превышающих первое критическое поле сверхпроводника, в его объеме последовательно формируется ансамбль вихрей, а затем и вихревая решетка. Индуцируемые в объеме сверхпроводника переменным полем H_0 токи j , вызывают депиннинг вихрей магнитного потока и их вязкое движение. Все это приводит к появлению электрического сопротивления переменному току (эффективного сопротивления) ρ_e сверхпроводника и соответственно диссипации энергии переменного поля. Величина сопротивления ρ_e оказывается зависимой от плотности индуцируемых токов, что и обуславливает

нелинейные свойства ВТСП. Количественно величину нелинейности оценивают измеряя гармонические составляющие напряжения отклика на измерительной катушке индуктивности или с помощью коэффициента нелинейностей

$$k_n = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}}, \quad (1)$$

где U_1 - напряжение первой гармоники сигнала отклика ВТСП, $U_2, U_3, U_4, \dots, U_n$ - напряжения высших гармоник сигнала отклика.

В случае воздействия суперпозиции H_e и H_0 появляются гармонические составляющие тока с частотами $(2n+1)\omega$, где $n=1, 2, 3, \dots$. Изменяя величину напряженности постоянного поля H_e можно управлять значением ρ_e от нуля до значения удельного электрического сопротивления в ВТСП в нормальном состоянии ρ_n . При этом наблюдаются максимумы на полевых зависимостях диссипации энергии $Q(H_e)$ в объеме сверхпроводника (в соответствии с законом Джоуля-Ленца) и амплитуд нечетных гармоник $U_{(2n+1)}(H_e)$.

Еще одним внешним фактором, изменяющим эффективное электрическое сопротивление сверхпроводников, является такой термодинамический параметр как температура. При изменении её величины от температуры начала сверхпроводящего перехода T_n до его окончания T_k также как и при воздействии постоянного поля происходит изменение ρ_e от величины электрического сопротивления в нормальном состоянии до нуля. На зависимостях $Q(T)$ и $U_{(2n+1)}(T)$ наблюдаются максимумы. Результаты таких исследований достаточно подробно рассмотрены в работах [5-10]. Однако в этих работах даны различные трактовки физической природы нелинейных свойств ВТСП: в рамках моделей джозефсоновской среды, перехода Березинского-Костерлица-Таулеса или размерного эффекта.

Голев Игорь Михайлович – ВУНЦ ВВС ВВА, д-р физ.-мат. наук, доцент, e-mail: imgolev@gmail.com
Сергеев Александр Викторович – ВГТУ, аспирант, e-mail: sergeev-av@bk.ru
Кадменский Виктор Георгиевич - ВУНЦ ВВС ВВА, канд. физ.-мат. наук, доцент, тел. 89066772723
Калядин Олег Витальевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: kaljadin@gmail.com

Для уточнения физических процессов обуславливающих нелинейные свойства ВТСП, были проведены подобные исследования для сверхпроводников с низкими плотностями критического тока $j_c(T=77K)$ порядка $1 \div 5 \text{ А/см}^2$. Экспериментально исследовались плотности возникающих вихревых токов по измерению напряжения $U_{(2n+1)}$ индуцированного в измерительной катушке, охватывающей сверхпроводник.

В работе использовались образцы висмутовой керамики состава $\text{Bi}_{1,8}\text{Pb}_{0,2}\text{Ca}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$, приготовление которых производилось по керамической технологии. Из приготовленного порошка с помощью гидравлического пресса формировались цилиндрические образцы диаметром 4 мм и длиной 25 мм при давлении компактирования до 4 т/см^2 , которые затем спекались при температуре $852 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 70-94 часов с последующим ее понижением до $450 \text{ }^\circ\text{C}$. В экспериментах применялись образцы с температурой начала перехода в сверхпроводящее состояние $\sim 105 \text{ K}$, шириной перехода более 5 К и плотностью не более $4,4 \text{ г/см}^3$. Для таких сверхпроводников характерно наличие поликристаллических гранул, объединённых межгранулярной средой, имеющие меньшие значения критического тока и большие величины $T_{\text{НМ}}$ и $T_{\text{КМ}}$.

В исследованиях измерялись зависимости напряжения гармоник в диапазоне температур $80 \div 120 \text{ K}$ при воздействии H_0 с частотой $10^2 \div 10^4 \text{ Гц}$ и амплитудой $10^{-4} \div 10^{-2} \text{ Тл}$.

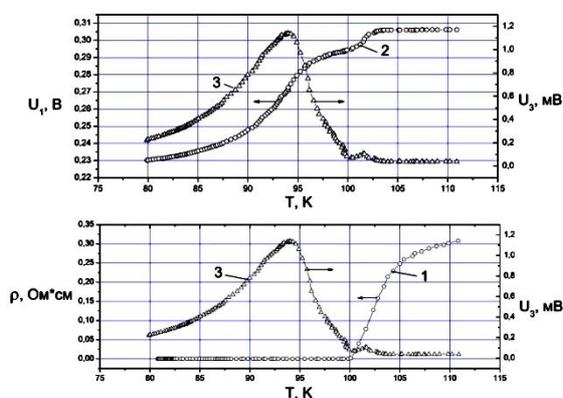


Рис. 1. Температурные зависимости удельного электросопротивления ρ по постоянному току, первой U_1 и третьей U_3 гармоник для Bi-2223 при воздействии H_0 частотой 1 кГц и амплитудой $5 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$. 1 - $\rho(T)$, 2 - $U_1(T)$, 3 - $U_3(T)$.

Обнаружено, что в сигнале отклика присутствуют только нечетные гармоники, причем зависимость $U_3(T)$ имеет более сложный характер, чем в известных результатах. На рис.1 кривой 2 представлены зависимости от температуры модуля комплексного напряжения первой гармоники $U_1(T)$. Видно, что на кривой $U_1(T)$ имеется два участка с

различными значениями $\frac{dU_1}{dT}$, что свидетельствует о наличии двух фаз с различными критическими температурами. В области температур, соответствующих этим участкам, наблюдаются максимумы на зависимости $U_3(T)$ (рис. 1, кривая 3).

Для уточнения полученных результатов нами были проведены исследования для однофазного сверхпроводника состава $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$, полученного про МТГ (Melt-Texture-Growth) технологии. Как и ожидалось, на температурной зависимости напряжения третьей гармоники наблюдается один максимум, расположенный в области температур ниже $T_{\text{Н}}$, когда электрическое сопротивление постоянно-му транспортному току практически равно нулю.

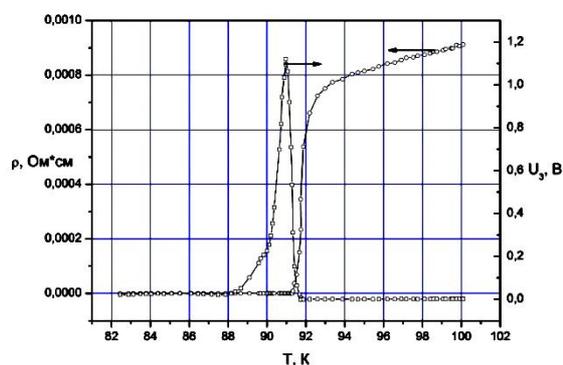


Рис. 2. Температурные зависимости удельного электросопротивления ρ и третьей U_3 гармоники для $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (МТГ технология) при воздействии переменного магнитного поля частотой 1 кГц и амплитудой $5 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$

Следует отметить, что появление третьей гармоники в спектре сигнала отклика связано в первую очередь, с нелинейной вольт-амперной характеристикой ВТСП. Нелинейные свойства обусловлены переходом гранул и (или) межгранулярной среды сверхпроводника в резистивное состояние при превышении амплитуды переменного тока $j(t)$, созданного в объеме сверхпроводника, величины критического тока этого объема j_c . В этом случае ВТСП можно характеризовать эффективной удельной проводимостью σ_e . В объеме ВТСП возникают импульсы напряжения, представляющие собой фрагменты синусоиды. Их можно характеризовать высотой $I_{\text{н макс}}$ и шириной, характеризуемой углом отсечки $\Theta = \theta \div \pi$ рад [11]. Значение угла отсечки возрастает с увеличением отношения $\frac{j(t)}{j_c}$. Периодическая последовательность импульсов напряжения является в этом случае нечетной функцией. Ее разложение в ряд Фурье имеет вид

$$u(t) = U_1 \cos \omega t + U_3 \cos 3\omega t + U_5 \cos 5\omega t + \dots \quad (2)$$

где $U_1 = k \cdot \gamma_1(\Theta) \cdot j(t)$, $U_3 = k \cdot \gamma_3(\Theta) \cdot j(t)$,
 $U_5 = k \cdot \gamma_5(\Theta) \cdot j(t)$; k - коэффициент, подбирае-
 мый экспериментально; $\gamma_1(\Theta)$, $\gamma_3(\Theta)$, $\gamma_5(\Theta)$ - ко-
 эффициенты гармоник, определяющие влияние угла
 отсечки Θ . Важно отметить, что коэффициент
 $\gamma_3(\Theta)$ вначале увеличивается с ростом угла Θ , при
 40° имеет максимальное значение, затем уменьша-
 ется до нуля при $\Theta=90^\circ$.

Коэффициент гармоник k_n в сигнале отклика
 не превышает величины 0,1, поэтому объем сверх-
 проводника можно считать в первом приближении
 линейной средой и полученные экспериментальные
 данные можно интерпретировать в предположении,
 что при воздействии на сверхпроводник с эффек-
 тивной проводимостью σ_e переменного магнитного
 поля с циклической частотой ω возникает скин-
 эффект.

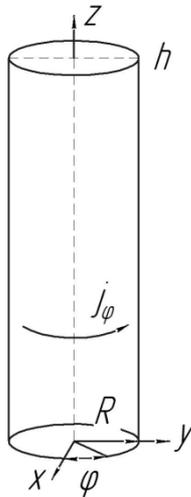


Рис. 3. Исследуемый образец сверхпроводника

Рассмотрим длинный цилиндрический провод-
 ник с параметрами $R, h, \varepsilon, \mu, \sigma$, (R, h - радиус и
 длина цилиндра, причем

$$h \gg R, \quad (3)$$

ε, μ - диэлектрическая и магнитная проницаемости,
 σ_e - эффективная удельная проводимость), находя-
 щийся внутри длинного соленоида с погонной плот-
 ностью витков n , по которым протекает ток

$$I_{col}(t) = I_0 e^{i\omega t} \quad (4)$$

с циклической частотой ω . Соленоид создает внут-
 ри себя однородное магнитное поле при отсутствии
 цилиндра (рис. 3).

$$H_z(t) = H_0 e^{i\omega t} \quad (5)$$

с амплитудой

$$H_0 = nI_0 = const \quad (6)$$

Наша задача - нахождение напряженностей
 электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей, плотно-
 сти \vec{j} тока внутри цилиндра, а также теплоты Q ,
 выделяющейся за единицу времени в цилиндре еди-
 ничной высоты. Из полной системы уравнений
 Максвелла получается уравнение для нахождения
 напряженности \vec{H} магнитного поля цилиндра

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (7)$$

где было учтено, что в проводящей среде плотность
 тока проводимости значительно больше плотности
 тока смещения

$$\vec{j}_{np} = \sigma \vec{E} \gg |j_{cm}| = \left| \frac{\partial H}{\partial t} \right| = \varepsilon \varepsilon_0 \omega E, \quad (8)$$

$$\sigma \gg \varepsilon \varepsilon_0 \omega.$$

В цилиндрической системе координат в силу
 аксиальной симметрии задачи все искомые пере-
 менные зависят только от радиальной координаты r ,
 а напряженность магнитного поля направлена по
 оси Z . Поэтому уравнение (7) приобретает вид

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dH_z}{dr} \right) = -i \mu \mu_0 \omega \sigma H_z = -\frac{2i}{\delta^2} H_z, \quad (9)$$

где величина δ является глубиной проникновения
 поля в проводник, то есть толщиной скин-слоя

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \mu_0 \omega \sigma_e}}. \quad (10)$$

С помощью замены

$$\zeta = \alpha r, \quad \alpha = \sqrt{\frac{2i}{\delta^2}} = \frac{\sqrt{2} e^{i\pi/4}}{\delta} = \frac{1+i}{\delta} \quad (11)$$

уравнение (9) приводится к каноническому виду

$$\frac{d^2 H_z(\zeta)}{d\zeta^2} + \frac{1}{\zeta} \frac{dH_z(\zeta)}{d\zeta} + H_z(\zeta) = 0. \quad (12)$$

Общим решением уравнения (12) является ра-
 венство

$$H_z(\zeta) = C J_0(\zeta) + C' Y_0(\zeta), \quad (13)$$

где C и C' - константы, $J_0(\zeta)$ - функция Бесселя
 первого рода нулевого порядка:

$$J_0(\zeta) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\zeta^{2n}}{2^{2n} (n!)^2}, \quad (14)$$

а $Y_0(\zeta)$ - функция Неймана нулевого порядка здесь не используется, так как в точке $r=0$ она становится бесконечно большой: $C'=0$.

Оставшаяся константа C находится из граничного условия для $r=R$:

$$C = \frac{H_0}{J_0(\xi_A)}; \zeta_R = \frac{\sqrt{2} e^{i\frac{\pi}{4}}}{\delta} R. \quad (15)$$

Поэтому окончательное выражение $H(\zeta)$ запишется в виде:

$$H_z(\zeta) = H_0 \frac{J_0(\zeta)}{J_0(\zeta_R)}. \quad (16)$$

Плотность вихревого тока находится из уравнения Максвелла

$$\vec{j}_\varphi = \text{rot}_\varphi \vec{H} = \frac{\alpha H_0}{J_0(\xi_R)} \frac{dJ_0(\xi)}{d\xi}. \quad (17)$$

Из свойств функций Бесселя:

$$J'_0(\zeta) = -J_1(\zeta), \quad (18)$$

где $J_1(\zeta)$ - функция Бесселя первого рода первого порядка:

$$J_1(\zeta) = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{\zeta^{2n+1}}{2^{2n+1} n!(n+1)!}, \quad (19)$$

получаем окончательное выражение для плотности вихревого тока

$$j(r) = \frac{\sqrt{2} e^{i\frac{\pi}{4}}}{\delta} H_0 \frac{J_1(\zeta)}{J_0(\zeta_R)}. \quad (20)$$

Из дифференциального закона Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ определим напряженность электрического поля $E_\varphi(r)$:

$$E_\varphi(r) = \frac{j(r)}{\sigma}, \quad (21)$$

то есть электрическое поле является вихревым.

Тепловая мощность Q^* омических потерь, проходящих на единичную высоту $h_0 = 1\text{ м}$ цилиндра, равна среднему по времени потоку энергии электромагнитного поля через боковую поверхность $S_\sigma = 2\pi h_0$

$$Q^* = - \int_{S_{\text{бок}}} \langle E_\varphi H_z \rangle dS = - \frac{1}{2} \frac{H_0^2 \pi R h_0}{\delta} \text{Re} \left[\frac{\alpha J_1(\zeta_R)}{J_0(\zeta_R)} \right]. \quad (22)$$

Проведем анализ зависимостей полученных величин от частоты ω переменного тока и от проводимости σ_e в двух предельных случаях.

1. Случай слабого скин-эффекта

$$|\alpha R| \ll 1, \text{ то есть } R \ll \delta. \quad (23)$$

Из определений функций Бесселя в виде степенных рядов для малых ζ получаем:

$$J_0(\alpha r) \approx 1 - \frac{\alpha^2 r^2}{4}; J_1(\alpha r) \approx \frac{\alpha r}{2} - \frac{\alpha^3 r^3}{16}. \quad (24)$$

Тогда выражение (16) для напряженности магнитного поля $H(r)$ принимает вид:

$$H(r) \approx H_0 \frac{4 - i\mu\mu_0\omega\sigma r^2}{4 - i\mu\mu_0\omega\sigma R^2} \approx H_0, \quad (25)$$

то есть магнитное поле внутри цилиндра практически не изменяется.

Для плотности вихревого тока $j_\varphi(r)$ в уравнении (20) в этом случае получаем

$$j(r) \equiv j_\varphi(r) = \frac{\mu\mu_0\omega\sigma r}{2} H_0 \left(i + \frac{(\mu\mu_0\omega\sigma r)^2}{8} \right). \quad (26)$$

Аналогичную зависимость имеет и напряженность вихревого электрического поля $E_\varphi(r)$ в (21), то есть величины j_φ и E_φ монотонно увеличиваются с ростом r и ω .

Для нахождения средней за период $T = 2\pi / \omega$ тепловой мощности $\langle Q^* \rangle$ в (22), рассеиваемой в цилиндре, воспользуемся формулами (25) для H и (21) для E .

$$\langle Q^* \rangle = \frac{\pi h_0}{64} \mu_0^2 \mu^2 \sigma \omega^2 R^4 H_0^2, \quad (27)$$

из (27) видно, что величина $\langle Q^* \rangle$ пропорциональна квадрату частоты ω .

2. Случай сильного скин-эффекта

$$|\alpha R| \gg 1, \text{ то есть } R \gg \delta \quad (28)$$

Запишем асимптотические выражения для функций Бесселя:

$$J_0(\zeta) = \sqrt{\frac{2}{\pi\zeta}} e^{i(\zeta - \frac{\pi}{4})}; J_1(\zeta) = \sqrt{\frac{2}{\pi\zeta}} e^{i(\zeta - \frac{3\pi}{4})}. \quad (29)$$

Поэтому напряженность $H(r)$ магнитного поля определяется зависимостью

$$H(r) = \sqrt{\frac{R}{r}} H_0 e^{-\frac{R-r}{\delta}} e^{-i\frac{R-r}{\delta}}, \quad (30)$$

откуда следует, что магнитное поле сосредоточено в узком поверхностном слое цилиндра толщиной δ , а далее практически отсутствует: $H=0$.

Такая же ситуация имеет место и для плотности тока, а также для напряженности $E_\varphi(r)$ вихревого электрического поля, то есть имеет место скин-эффект.

$$j(r) = \sqrt{\frac{R}{2}} \frac{H_0}{\delta} e^{-\frac{3\pi}{4}} e^{-\frac{(R-r)}{\delta}} e^{-i\frac{(R-r)}{\delta}}. \quad (31)$$

Тогда рассеиваемая тепловая мощность $\langle Q^* \rangle$ (27) будет равна

$$\langle Q^* \rangle = \frac{h_0 R H_0^2 \sqrt{\mu_0 \mu \omega}}{\sqrt{2\sigma}}, \quad (32)$$

то есть ее величина растет с частотой пропорционально $\sqrt{\omega}$.

Формулы (27) и (32) описывают величину джоулева тепла, выделяемого вихревым током с частотой ω . При превышении амплитуды этого тока $j_\varphi(r, t)$ значения плотности критического тока j_c данного объема сверхпроводника приводит к возникновению в нем резистивного состояния, характеризующегося эффективной проводимостью σ_e .

Важно отметить, что изучение поведения высших гармоник позволяет получать информацию только о тех областях образца, которые находятся при заданной температуре в сверхпроводящем состоянии и обладают нелинейными свойствами. Для несверхпроводящих областей выполняется принцип суперпозиции. Вихревой ток первой гармоники протекает как через сверхпроводящие так и не сверхпроводящие области. В этом случае связанные с этим диссипативные процессы разделить невозможно.

Из формул (27) и (32) следует, что в случае слабого скин-эффекта тепловая мощность прямо пропорциональна величине σ_e , а в случае сильного обратно пропорциональна $\sqrt{\sigma_e}$. Тогда на зависимости $U_3(T)$ (рис. 1, кривая 3) можно выделить две области, где наблюдается слабый скин-эффект: $105 \div 101$ К и $100 \div 94$ К. В диапазоне же $101 \div 100$ К и $94 \div 80$ К имеет место сильный скин эффект. Можно предположить, что в области температур

$105 \div 84$ К скин-эффект связан с процессами в объеме зерен, а при температурах $102 \div 82$ К – в объеме образца в целом, включая объем гранул и межгранульную среду.

Проводимость ВТСП можно представить в этом случае как $\sigma_e = \rho_{es}^{-1}$, где

$$\rho_{es} = c\rho_{eg} + (1-c)\rho_{ei} \quad (33)$$

здесь c – объемная доля гранул в сверхпроводнике, ρ_{eg} , ρ_{ei} – эффективные удельные сопротивления гранул и межгранулярной среды. Тогда с учетом формулы (10), и того что температура перехода гранул в сверхпроводящее состояние выше на кривой зависимости $U_3(T)$ должны наблюдаться два максимума.

В заключение можно отметить, что в керамических сверхпроводниках, представляющих собой систему гранул и межгранулярной среды, характеризующихся различными критическими параметрами, в рамках модели скин-эффекта, объяснено наличие двух максимумов на температурной зависимости третьей гармоники. Важно отметить, что напряжение третьей гармоники несет информацию только о сверхпроводящих областях образцов, обладающих нелинейными свойствами. Это может быть использовано как эффективный инструмент исследования физических явлений при сверхпроводящих переходах.

Литература

1. Голев И.М., Милошенко В.Е., Воронов А.А. Нелинейные эффекты иттриевой керамики в нестационарном магнитном поле // Письма в ЖТФ. 1999. т.25, вып.20. С.60-63.
2. Голев И.М., Милошенко В.Е. Воронов А.А. Нелинейные электродинамические свойства металлооксида YBaCuO в неравновесных условиях // Физика металлов и металловедение. 2000. т.89, № 3. С.255-258.
3. Исследование нелинейных свойств высокотемпературных сверхпроводников в токовом состоянии [Текст] / И.М. Голев, В.П. Трифонов, В.Е. Милошенко, А.А. Воронов // Вестник Воронежского государственного технического университета. Сер. Материаловедение. - 2000. - Вып.1.8. - С.72-74.
4. Андреева, Н.А. Поведение вихрей движущихся в градиентном магнитном поле [Текст] / Н.А. Андреева, В.Е. Милошенко, И.М. Голев // Вестник Воронежского государственного технического университета. Сер. Материаловедение. – 1999. - Вып. 1.6. - С. 134-136.
5. Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д., Славкин В.В. Управление формированием гармоник на основе YBa₂Cu₃O_{7-x} // Журнал технической физики, 2008, Т. 78, № 10, с. 65-69.
6. Васютин М.А., Головашкин А.И., Кузьмичев Н.Д. Нелинейность вольт-амперных характеристик монокристаллов YBa₂Cu₃O_{7-x} и переход Березинского-Костерлица-Таулеса // Физика твердого тела, 2006, Т. 48, № 1, с. 2128-2135.
7. Зеликман М.А. Поведение высших гармоник отклика гранулированных ВТСП на низкочастотное магнитное поле // Физика твердого тела, 2000, Т. 42, № 10, с. 1768-1773.

8. Покровский В.Я., Горлова И.Г., Зыбцев С.Г. Нелинейная проводимость високров $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$: особенности вблизи сверхпроводящего перехода // Физика низких температур, 1996, Т. 22, № 6, с. 655-658.

9. Далакова Н.В., Белевцев Б.И., Е.Ю. Беляев, А.С. Панфилов Нелинейные эффекты в проводимости слаболегированных купратов $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ в антиферромагнитном состоянии при низких температурах // Физика низких температур, 2014, Т. 40, № 5, с. 513-526.

10. Русаков В.Ф. Размерные эффекты в ртутной керамике и ниобиевых сплавах // Научные труды ДонНТУ. Серия: Химия и химическая технология, 2013, выпуск 1 (20), с. 69-81.

11. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов.– М.: Радио и связь, 1982.– 280 с.

Воронежский государственный технический университет

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

NONLINEAR PROPERTIES OF GRANULATED AND INTERGRANULAR MEDIUM HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS OF THE SYSTEM Bi-Sr-Ca-Cu-O

I.M. Golev, A.V. Sergeev, V.G. Kadmenskiy, O.V. Kalyadin

The paper carries out the research on nonlinear properties of granulated superconductors of the system Bi-Sr-Ca-Cu-O in conditions of superconducting transition. For the first time was discovered two maximum of response signal on temperature dependence third harmonic under the influence of alternating magnetic field. It was done a calculation of thermal power ohmic losses in case of strong and weak skin-effect. It is shown that third harmonic carries the information only about granulated high-temperature superconductors which have got nonlinear properties

Key words: high-temperature superconductor, nonlinear properties, skin-effect, energy dissipation, effective electric conduction

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, УПРОЧНЕННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ

О.Д. Козенков, Т.В. Пташкина, А.Т. Косилов, Д.Г. Жилияков

Исследована износостойкость композиционных электрохимических покрытий с никелевой матрицей, упрочненных углеродными нанотрубками или ультрадисперсными алмазами. Покрытия были получены в процессе электролитического осаждения из соответствующих суспензий углеродных наноматериалов в диспергирующей среде на основе электролита никелирования. Установлено, что при увеличении концентрации наночастиц в суспензии износостойкость композиционных электрохимических покрытий сначала увеличивается в 2-3 раза пропорционально концентрации, достигает максимального значения, затем плавно незначительно снижается. Экспериментальные результаты обоснованы в рамках модели дисперсного упрочнения. Более низкие значения износостойкости, полученные для КЭП, никелевая матрица УНТ связаны с геометрией дисперсных частиц углеродных наноматериалов

Ключевые слова: композиционные электрохимические покрытия, никелевая матрица, углеродные наноматериалы, углеродные нанотрубки, ультрадисперсные алмазы, суспензии углеродных наноматериалов, износ, износостойкость, дисперсное упрочнение

Развитие современной науки, техники и технологии требует создания новых материалов, с особыми, наперед заданными свойствами, превосходящими обычные механические свойства традиционных конструкционных материалов. Актуальной задачей для различных отраслей промышленности является повышение износостойкости деталей нанесением на их поверхность композиционных электрохимических покрытий (КЭП). Такие материалы находят все большее применение в авиастроении, космической технике и прочих отраслях машиностроения [1].

Проблеме повышения эксплуатационных характеристик материалов в том числе и композиционных электрохимических покрытий уделяется достаточно много внимания. Однако, в большинстве случаев, если говорить о композиционных электрохимических покрытиях, из рассмотрения выпадает процесс формирования КЭП в связи с состоянием суспензии, технологическими параметрами нанесения КЭП и их свойствами. Изучение наноструктурированных композиционных материалов в связи с технологическими параметрами их получения необходимо, для понимания элементарных стадий, сопровождающих процесс создания КЭП, и управления их свойствами.

В данной работе проведено изучение износостойкости КЭП с никелевой матрицей, содержащих ультрадисперсные алмазы (УДА) или углеродные нанотрубки (УНТ). КЭП были получены в процессе электрохимического осаждения из суспензий УДА или УНТ созданных в диспергирующей среде на основе водного раствора электролита никелирования.

Изнашивание можно рассматривать как разновидность усталостного разрушения, то есть как разрушение и отделение частиц материала с поверхности твердого тела в результате накопления остаточной деформации при трении, проявляющееся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. Износ – это результат изнашивания, а износостойкость – способность материала сопротивляться изнашиванию, оцениваемая величиной, обратной скорости износа или интенсивности изнашивания [2].

Механизмы, величина и интенсивность износа определяются большим числом различных факторов, на пример:

- внешние механические воздействия:

характер движения контактирующих тел (трение, удары, течение), величина нагрузки, скорость перемещения, локальное повышение температуры в месте контакта;

- физико-химическое воздействие среды;

- свойства материалов пар трения.

Виды изнашивания можно классифицировать следующим образом:

- допустимое (нормальное изнашивание):

нормальное окислительное изнашивание; нормальное изнашивание неокислородного происхождения; окислительное абразивное изнашивание;

- недопустимое (повреждаемость):

схватывание I рода – холодный задиры; схватывание II рода – горячий задиры; фреттинг-процесс; абразивная повреждаемость; контактная усталость – накопление повреждений и разрушение поверхности под действием циклических контактных нагрузок; коррозия, кавитация, эрозия, смятие и др.

Методы испытаний на износ, которые обычно моделируют реальные условия эксплуатации детали или механизма, многочисленны. Результаты испытаний разными методами по этой причине обычно несопоставимы между собой, поскольку в них чаще всего реализуются разные механизмы изнашивания, используются разные механические воздействия и рабочие среды.

Козенков Олег Дмитриевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: kozenkov_w@mail.ru
Пташкина Татьяна Владимировна – ВГТУ, инженер-исследователь, e-mail: tatptashkina@yandex.ru
Косилов Александр Тимофеевич – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, тел. 8(473) 2466647
Жилияков Дмитрий Геннадьевич – ВГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, тел. 8(473)246-66-47

Испытания, проведенные в данной работе, относятся к нормальному окислительному абразивному изнашиванию.

Введение в металлическую матрицу мелкодисперсных твердых частиц УДА или УНТ повышает твердость материала КЭП. Но износ – это сложный физико-химический процесс и сведение увеличения износостойкости только к повышению твердости материала было бы не правильно. В процессе износа важен комплекс физико-химических характеристик материала, таких как: концентрация частиц в металлической матрице, наличие или отсутствие взаимодействия частиц с металлической матрицей, изменение структуры КЭП, прежде всего размеров кристаллитов и пористости покрытия, изменение механических свойств КЭП из-за ведения частиц в металлическую матрицу (упрочнение, разупрочнение, охрупчивание и т.п.).

Образцы никелевых КЭП с углеродными наночастицами готовились в процессе гальванического осаждения покрытия из электролита никелирования, представляющего собой суспензию УДА или УНТ в диспергирующей среде на основе водного раствора электролита. Для создания суспензии использовался сернокислый электролит никелирования с добавлением дисперсных частиц УДА или УНТ, концентрация которых составляла $C = 0-5$ г/л. Для получения качественных суспензий электролит с навеской УДА или УНТ подвергался ультразвуковому воздействию в течение 10 мин. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовалась ультразвуковая ванна марки УХ 9050. В процессе приготовления суспензий поддерживалась постоянная температура тающего льда $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ для предотвращения ее разогрева и возможной коагуляции. Методика приготовления суспензий УДА и УНТ и используемые материалы подробно описаны в работах [3, 4].

Никелевые КЭП наносились на стальные подложки в процессе электролитического осаждения из подготовленных суспензий при плотностях тока $j = 2-6$ А/дм².

Для оценки механических свойств КЭП с никелевой матрицей и частицами УДА или УНТ были проведены испытания на износостойкость покрытий.

Испытания проводились на шлифовально-полировальном станке МР-2В при постоянной нагрузке $P = 200$ г и фиксированной линейной скорости движения абразива относительно образца. Схема испытаний на износ показана на рис. 1.

Для проведения эксперимента использовалась наждачная бумага Р 2500. Радиус круга, на котором проводились испытания, $R = 10$ см. Частота вращения круга $\nu = 0,5$ Гц. Все образцы подвергались истиранию в течение 35 минут. Замер изменения толщины производился через 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30 и 35 минут. Концентрация УДА или УНТ в суспензии на основе электролита никелирования составляла: 0 г/л, 0,5 г/л, 1 г/л, 3 г/л и 5 г/л.

На рис. 2, 3 представлены экспериментальные результаты определения износостойкости никелевых

КЭП с УДА и УНТ в зависимости от технологических условий их получения.

На рис. 2 показана экспериментальная зависимость износостойкости никелевого КЭП от концентрации частиц УДА или УНТ в суспензии на основе водного раствора электролита никелирования.

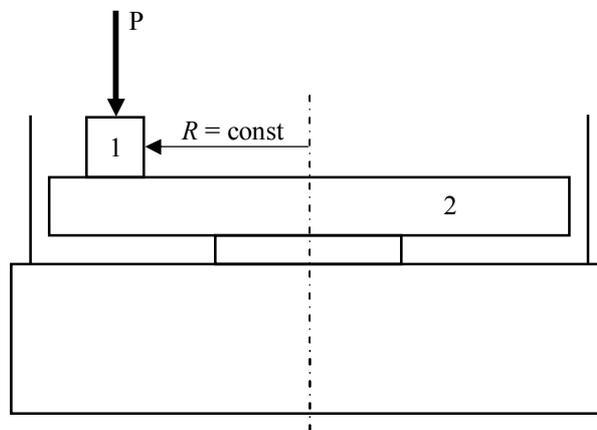


Рис. 1. Схема испытаний КЭП на износ. P – постоянная по величине нагрузка, 1 – образец, 2 – шлифовальный круг

На рис. 3 показана экспериментальная зависимость износостойкости никелевых КЭП от концентрации частиц УДА или УНТ в покрытии.

Как видно характер зависимости на рис. 3 коррелирует с данными представленными на рис. 2. Кроме того, отсутствует прямая пропорциональная зависимость между концентрацией частиц УДА или УНТ в КЭП и износостойкостью.

Как видно из рис. 2 а, износостойкость КЭП с УДА растет в интервале концентраций УДА в электролите от 0 до 2 г/л и при концентрации ~ 2 г/л достигает максимального значения.

При концентрациях частиц УДА в КЭП от 2 до 4 об. % в зависимости от плотности тока износостойкость максимальна (рис. 3 а).

При повышении концентрации частиц УНТ в суспензии износостойкость сначала повышается в интервале концентраций от 0 до 1 г/л (в зависимости от плотности тока), затем незначительно снижается (рис. 2 б).

Максимальная износостойкость достигается при плотности тока $2 - 4$ А/дм² и концентрации частиц УНТ в водной суспензии на основе никелевого электролита до 2 г/л, что соответствует 4 об. % частиц в покрытии (рис. 3 б).

Как следует из экспериментальных результатов износостойкость КЭП никелевая матрица с дисперсными частицами УДА существенно выше, чем КЭП никелевая матрица с УНТ. Это может быть связано с различной геометрией дисперсных частиц УДА и УНТ. Частицы УДА – это равноосные кристаллы алмазов, а частицы УНТ – вытянутые в одном направлении образования, которые зачастую переплетены между собой и могут образовывать достаточно крупные агломераты.

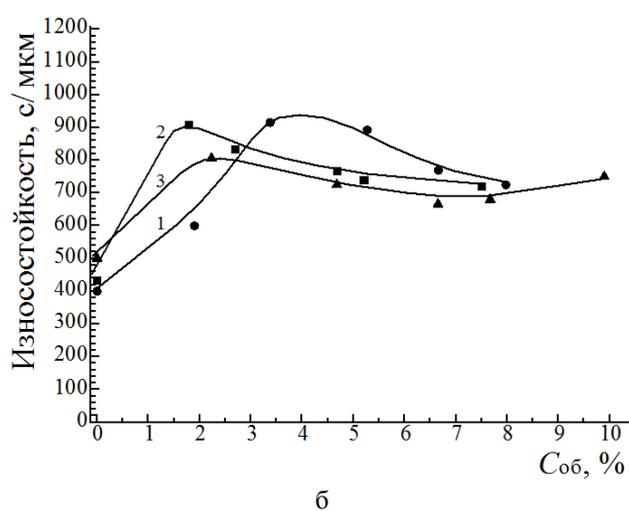
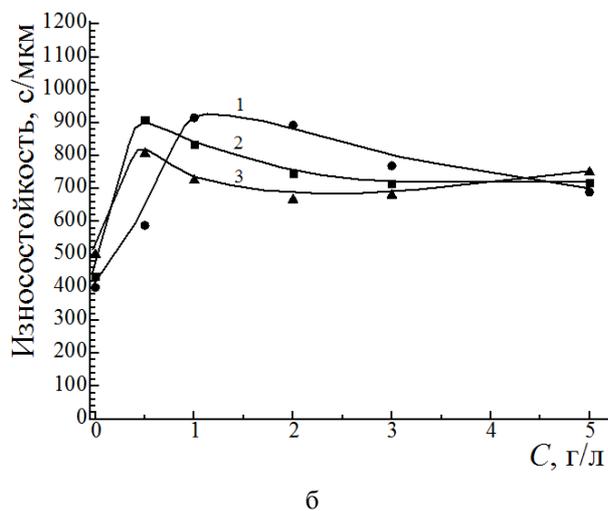
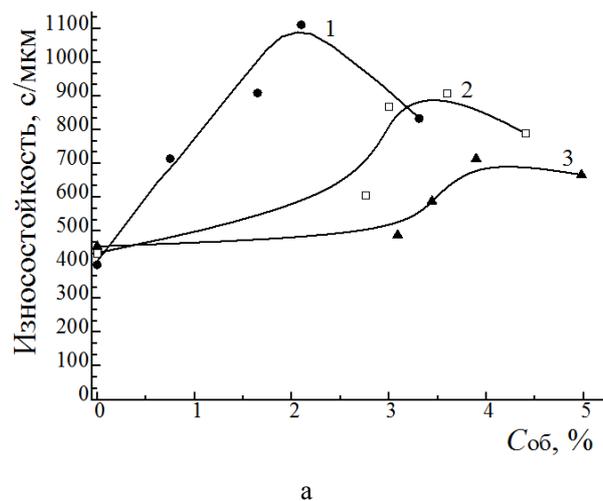
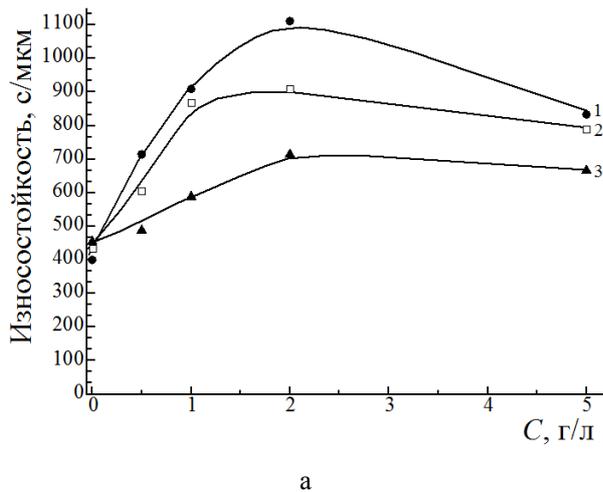


Рис. 2. Зависимость износостойкости КЭП с никелевой матрицей от концентрации частиц в суспензии при различных плотностях тока: 1 – 2 А/дм², 2 – 4 А/дм², 3 – 6 А/дм². а – Ni-УДА, б – Ni-УНТ

Рис. 3. Зависимость износостойкости КЭП с никелевой матрицей от концентрации частиц в покрытии при различных плотностях тока: 1 – 2 А/дм², 2 – 4 А/дм², 3 – 6 А/дм². а – Ni-УДА, б – Ni-УНТ

По мере роста концентрации частиц УДА или УНТ в никелевой матрице износостойкость растет, что связано с увеличением концентрации прочных дисперсных частиц углеродных наноматериалов в никелевой матрице. Некоторое снижение износостойкости, при дальнейшем повышении концентрации дисперсных частиц в никелевой матрице, может быть связано с объединением отдельных частиц в агломераты. В таких агломератах отдельные частицы УДА или УНТ не связаны между собой и их скопления, по сути, представляют собой поры в металлической матрице, из которых упрочняющие частицы легко выкрашиваются при приложении истирающей нагрузки. Кроме того, снижение износостойкости при повышении концентрации частиц УДА и УНТ в никелевой матрице может быть связано с огрублением структуры покрытия при внедрении в металлическую матрицу крупных агломератов

углеродных материалов с одновременным увеличением пористости КЭП.

Увеличение плотности тока, которое прямо пропорционально скорости роста покрытия, всегда приводило к снижению качества КЭП и к снижению его износостойкости. С увеличением скорости роста покрытия падает его качество и возрастает вероятность включения в КЭП крупных агломератов частиц углеродных материалов.

Известно, что никель хорошо взаимодействует с углеродом. Растворимость углерода в никеле при комнатной температуре достаточно высокая. Кроме того, никель при повышенных температурах вступает во взаимодействие с углеродом с образованием химических соединений [5]. Такое повышенное средство углерода и никеля обеспечивает дополнительное взаимодействие между дисперсными частицами углеродных наноматериалов и никелевой мат-

рицей, что приводит к дополнительному повышению износостойкости КЭП.

Результаты, полученные в работе, позволяют сделать следующие выводы:

- отработана лабораторная технология получения КЭП с никелевой матрицей и дисперсными частицами УДА или УНТ, позволяющая получать композиционные покрытия в процессе электрохимического осаждения с высоким качеством, и хорошей адгезией;

- исследована зависимость износостойкости никелевых КЭП с УДА или УНТ в зависимости от концентрации дисперсных частиц углеродных наноматериалов в суспензии и в покрытии. Износостойкость КЭП с УДА или УНТ увеличивается с увеличением концентрации частиц в суспензии или в покрытии и с увеличением плотности тока осаждения, но при концентрации частиц в суспензии свыше 2 г/л незначительно снижается.

Экспериментальные результаты, полученные в работе, могут быть полезны при разработке промышленной технологии нанесения на поверхность деталей, работающих в условиях трения, износостойких КЭП на основе металлической матрицы с использованием углеродных наноматериалов в качестве дисперсных упрочняющих частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках государственного задания на НИР в ФГБОУ ВПО Воронежский государственный технический университет на 2014 г.

Литература

1. Сайфуллин Р.С. Неорганические композиционные материалы. М.: Химия, 1983. 304 с.
2. ГОСТ 23.002–78. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения
3. Козенков, О.Д. Разработка водных суспензий углеродных наноматериалов для электролитов. [Текст] / О.Д. Козенков, В.А.Юрьев, Т.В. Пташкина // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2011. - Т. 7, № 10. - С. 21-24.
4. Козенков, О.Д. Исследование суспензий ультрадисперсных алмазов в диспергирующей среде на основе водных растворов электролитов [Текст] / О.Д. Козенков, Т.В. Пташкина, А.Т. Косилов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №. 7.1. – С. 65-69.
5. Кубрак П.Б. Электрохимическое осаждение и свойства композиционных никелевых покрытий, содержащих углеродные наноматериалы [Текст] / П.Б. Кубрак, В.Б. Дроздович, И.М. Жарский и др. // Гальванотехника и обработка поверхностей. - 2012. - Т. XX. - С. 43-49.

Воронежский государственный технический университет

WEAR RESISTANCE COMPOSITE ELECTROCHEMICAL COATINGS HARDENING OF CARBON NANOMATERIALS

O.D. Kozenkov, T.V. Ptashkina, A.T. Kosilov, D.G. Zhilyakov

Studied the wear resistance of composite electrochemical coatings with the nickel matrix, hardened-tion of carbon nanotubes or ultrafine diamonds. Coatings were prepared in-matic electrolytic deposition of the respective suspensions of carbon nanomaterials in a dispersive medium based on nickel electrolyte. It is found that increasing the concentration of nanoparticles in suspension wear-bone composite electrochemical coating initially increases 2-3 times in proportion to the concentration, reaches a maximum and then gradually decreases slightly. Experimental results on-destined by the model of dispersion hardening. Lower values obtained for the wear resistance of the CEP nor the CNT-nikcel matrix associated with the geometry of the dispersed particles of carbon nanomaterials

Key words: composite electrochemical coatings, nickel matrix nanomaterial carbon, carbon nanotubes, ultra diamonds, suspensions of carbon nanomaterials, wear, wear-bone, dispersion strengthening