

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

Особенности диагностики конструкций специальной техники с использованием лазерного голографического интерферометра Г.В. Зибров, В.Н. Старов, Е.В. Смоленцев, А.В. Попов.....	4
Методика изготовления сложнопрофильного электрода-инструмента по технологии быстрого прототипирования А.П. Суворов, А.В. Кретинин, А.В. Кузовкин.....	11
Оценка шероховатости подготовленной механическим способом поверхности под лакокрасочное покрытие Ю.П. Земсков, Ю.С. Ткаченко.....	15
Модификация поверхностного слоя металлических изделий С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев.....	19
Моделирование энергосиловых параметров резания методами теории подобия и размерностей Ю.А. Цеханов.....	27

Информатика, вычислительная техника и управление

Математическая модель беспилотного летательного аппарата в условиях движения с возмущающими воздействиями Е.М. Васильев, Н.О. Мельник.....	31
Параллельное исполнение SQL-запроса в системах с использованием репликации и секционирования отношения М.В. Локшин, С.А. Рыков.....	34
Автоматизированное разбиение плоских областей на макроэлементы в методе внешних конечно-элементных аппроксимаций А.А. Успехов, А.С. Троценко, Д.А. Болотцев.....	37
Информационные средства обучения и сохранения накопленных знаний специалистов А.И. Сукачев, А.В. Барабанов, В.В. Сафронов, А.В. Гаганов.....	41
Анализ эффективности использования метода нечёткой классификации и генетических алгоритмов в интеллектуальной системе поддержки принятия врачебных решений А.А. Спирычин, В.Л. Бурковский, А.П. Воропаев.....	45
База правил для нечеткой системы управления движением мобильного робота Т.М. Леденева, В.В. Кашко.....	49
Разработка универсального модуля обмена технологическими данными для IC:PDM В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, Н.И. Гребенникова, С.А. Коваленко.....	54

Радиотехника и связь

Разработка альтернативных методов тестирования и отладки цифровых схем О.Ю. Мартынов, Е.Д. Алперин.....	57
Сравнение устойчивости карбид-кремниевых MESFET и кремниевых LDMOS мощных СВЧ-транзисторов к гамма-излучению М.И. Черных, А.Н. Цоцорин, В.А. Кожевников.....	61
Способ оценки помехоустойчивости систем радиомониторинга В.М. Питолин, Е.В. Кравцов, М.Ф. Пашук, М.Д. Стадников.....	64

Рассеяние электромагнитных волн на сфере, расположенной в двумерно неоднородном поглощающем плазменном образовании	69
А.Н. Косенков.....	
Экспериментально-расчетная методика оценки влияния согласования с нагрузкой на характеристики антенн	72
С.Н. Панычев, М.Ф. Пашук, Н.А. Самоцвет, А.А. Серегин, С.В. Суровцев.....	
Технологические особенности изготовления прозрачных тонкопленочных транзисторов	77
С.А. Белоусов, Ю.В. Иванов, А.А. Носов, С.И. Рембеза.....	

Физика

Расчет напряженно-деформированного состояния в системе «двойник-трещина нормального отрыва в зерне поликристалла»	80
Т.В. Дробышевская, О.М. Остриков.....	
Моделирование вынужденных внутренних капиллярных волн	87
С.Е. Савотченко.....	

Энергетика

Влияние профиля поверхности плоского прямого ребра на теплопередачу	91
А.А. Пригожин, И.С. Аношин, С.В. Дахин.....	
Имитационное 3D-моделирование течения газа в безлопаточном направляющем аппарате малоразмерной осевой газовой турбины	96
Д.В. Боровков, Ю.В. Демьяненко.....	
Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции	101
А.К. Тищенко, Е.М. Васильев, А.О. Тищенко.....	
Моделирование и анализ эффективности средств снижения теплового контраста с учетом формы и рельефа их поверхности	107
В.Г. Керков, В.Д. Мочалин, Г.Л. Тюрин.....	

**ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ КОНСТРУКЦИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО
ИНТЕРФЕРОМЕТРА**

Г.В. Зибров, В.Н. Старов, Е.В. Смоленцев, А.В. Попов

Представлены особенности создания методов и технологий нового поколения при диагностике прочностных показателей посредством регистрации акустико-эмиссионных сигналов в силовых элементах конструкций при помощи разработанного лазерного голографического интерферометра. Данная система позволяет достигнуть стабильности частотных характеристик в широкой полосе частот, что существенно повышает динамический диапазон регистрирующего тракта, достоверность и точность акустико-эмиссионного контроля

Ключевые слова: акустическая эмиссия, технологии, технологическая наследственность

Неразрушающие методы диагностики основных элементов сложной техники и контроля состояния объектов (энергетические реакторы, самолеты, ракетно-космические системы, военная техника и др.) всегда являлись актуальными технологическими вопросами. Особое место занимает применение для диагностики акустической эмиссии (АЭ) и измерения её параметров в силовых элементах конструкций сложной техники. При этом используют электрические сигналы, полученные в результате преобразования энергии колебаний в электрическую, для того, чтобы дальнейшую обработку информации выполнить с помощью электронной аппаратуры.

У сигналов АЭ есть особенности: сложный характер, низкий энергетический уровень, широкий диапазон частот, большой динамический диапазон параметров и др. Это предъявляет соответствующие требования к измерительной аппаратуре [1-6]. При многих методах основной задачей является измерение малых высокочастотных перемещений поверхности контролируемой конструкции, вызванных упругими волнами эмиссии (рис. 1).

В настоящее время часто применяется и наиболее известен метод измерения АЭ с помощью пьезопреобразователей (ПЭП). Преимуществом пьезоэлектрического способа регистрации является высокая эффективность преобразования и малогабаритность пьезопреобразователей. Однако немало и существенных недостатков, а именно:

- при работе ПЭП в резонансном режиме возникают значительные искажения сигналов, а форма сигнала на выходе ПЭП отличается от формы механического импульса? что снижает достоверность оценки информативных параметров

АЭ (см. рис. 2);

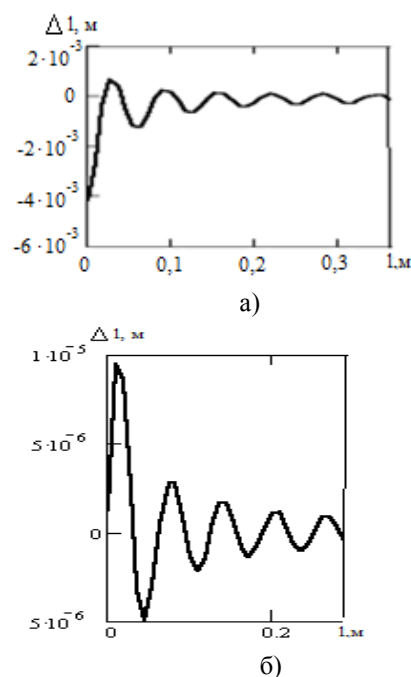


Рис.1. Перемещения поверхности конструкции, вызванные импульсом АЭ. Обозначено: а) продольные перемещения; б) поперечные перемещения

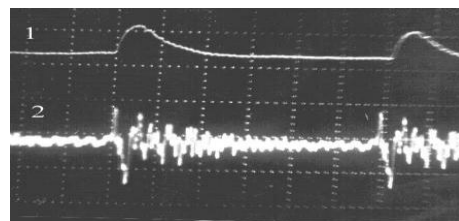


Рис. 2. Осциллограммы регистрируемых импульсов АЭ. Обозначено: 1 – оптическим интерферометром; 2 – пьезопреобразователем

Зибров Геннадий Васильевич - ВУНЦ ВВС «ВВА», д-р пед. наук, профессор, тел. (473) 236-90-18
Старов Виталий Николаевич - Воронежский институт ГПС МЧС России, д-р техн. наук, профессор, e-mail: vigps_onirio@mail.ru
Смоленцев Евгений Владиславович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (910) 746-40-75
Попов Алексей Владимирович – ВУНЦ ВВС «ВВА», д-р техн. наук, доцент, тел. (473) 236-90-18

- обязательным условием применения пьезопреобразователей является необходимость обеспечить акустический контакт датчика с объектом измерений. Для этого требуется

отполированная ровная площадка на объекте контроля и создание давления прижима датчика к конструкции. При проведении экспериментальных исследований изменение давления прижима на пьезопреобразователь на один Ньютон может вызывать изменение амплитуды регистрируемых сигналов более, чем в 1,4 раза;

- применение пьезопреобразователей ограничено при высоких температурах из-за низкой температуры Кюри используемых пьезоматериалов;

- существуют трудности при контроле объектов, находящихся в агрессивных средах, широко используемых в ВВТ;

- из-за большого разброса параметров промышленных пьезокерамик и зависимости характеристик от конструктивных факторов существуют трудности воспроизводимости характеристик пьезопреобразователей.

Укажем особенности оптических методов измерения малых перемещений. Известные оптические методы с использованием АЭ безинерционны. Они не требуют акустического контакта с объектом измерений, позволяют проводить измерения на расстоянии, имеют высокую воспроизводимость результатов. Но для регистрации малых амплитуд смещений поверхности конструкции, вызванных АЭ (10^{-7} – 10^{-12} м), меньших длины световой волны оптического излучателя (для гелий-неонового лазера длина волны $0,63 \cdot 10^{-6}$ м), необходимо создание измерительных средств.

Для указанных сверхмалых перемещений используют измерители, основанные на использовании двухлучевых и многолучевых интерферометров и когерентного лазерного излучения. Они могут быть применены для измерений непосредственно параметров АЭ, а также для решения некоторых вспомогательных задач, связанных с практическим применением АЭ при неразрушающих испытаниях (для снятия характеристик и метрологической аттестации пьезопреобразователей АЭ) [1-4]. При этом интерферометр должен быть настроен таким образом, чтобы на экране в точке размещения фотоприемника наблюдались не полосы интерференции, а однородное поле, яркость которого зависит от разности фаз интерферирующих лучей [1,2].

Этим условиям удовлетворяют двухлучевые интерферометры на основе интерферометра Майкельсона и многолучевые интерферометры на основе интерферометра Фабри-Перо [1].

Установлено, что чувствительность многолучевых интерферометров превышает чувствительность двухлучевых интерферометров. Для многолучевой интерференции необходимо иметь отражатели (зеркала) с большим коэффициентом отражения, заметным коэффициентом пропускания и как можно меньшим коэффициентом поглощения.

Для этого могут быть использованы отражатели с металлическими слоями из серебра [2].

Системы такого типа представляют собой многослойные диэлектрические зеркала с чередующимися тонкими прозрачными слоями оптической толщины h_i и показателем преломления слоя – n_i . При условии чередования слоев $n_i h_i = \lambda/4$ интерферометр с таким отражателем работает на «усиление». Это объясняется тем, что при скачке фазы $\lambda/2$ отраженные лучи в слоях $2n_i h_i = \lambda/2$ на границе раздела слоев интерферируют на усиление.

Для вычисления коэффициентов отражения R и пропускания T такого многослойного зеркала необходимо просуммировать все интерферирующие лучи. Приведем конечные формулы для коэффициента пропускания T [1]:

$$T = \frac{k_0}{B^2[(b_2^2 - b_1^2)\sin^2 \varphi + b_1] + D^2 m_1 + B m_2}, \quad (1)$$

где

$$m_1 = \frac{1}{u_1^2 t g^2 - 1} \left[(b_2^2 - b_1^2) u_2^2 \cos^2 \varphi + \frac{b_3^2 u_1^2}{\cos^2 \varphi} + 2b_2 b_3 u_1 u_2 + b_1^2 u_2^2 \right], \quad (2)$$

$$m_2 = \frac{1}{\sqrt{u_2^2 t g^2 - 1}} \left[(b_2^2 - b_1^2) u_2^2 |\sin 2\delta| + 2b_2 b_3 u_1 u_2 |t g \varphi| \right], \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 h_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 h_2, \quad \mu = \frac{N-1}{2}, \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{n + n_0}{2n}, \quad b_2 = \frac{nn_0 + n_1^2}{2nn_1}, \quad b_3 = \frac{nn_0 - n_1^2}{2nn_1},$$

$$u_1 = \frac{n_1 - n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}}, \quad u_2 = \frac{n_1 + n_2}{2\sqrt{n_1 n_2}}, \quad (5)$$

$$\text{обозначим } y = 1 - \frac{(n_1 + n_2)^2}{2n_1 n_2} \sin^2 \varphi,$$

$$\text{если } |y| < 1, \text{ то } \begin{cases} B = (-1)^m \cos \mu \gamma \\ D = (-1)^{m+1} \sin \mu \gamma, \\ \gamma = \arctg \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{-y} \end{cases}$$

$$\text{если } |y| > 1, \text{ то } \begin{cases} B = (-1)^m \cos \mu \gamma \\ D = (-1)^{m+1} \sin \mu \gamma, \\ \gamma = \arctg \frac{\sqrt{y^2 - 1}}{-y} \end{cases}$$

где n – показатель преломления зеркала (поверхности контролируемой конструкции); n_0 – показатель преломления внешней среды; n_1 и n_2 – показатели преломления слоев голограммы; h_1 и h_2 – толщина слоев голограммы; λ – длина волны света; φ – разность фаз интерферирующих лучей; N – число отражательных слоев в эмульсии голограммы; $R=1-T$ – коэффициент отражения.

Создание таких многослойных

интерференционных зеркал возможно с использованием голографических методов [2]. При записи голограмм изменяются показатели преломления и преломления эмульсии фотопластины. Запись создаваемой в пространстве точечными источниками объёмной интерференционной картины приводит к созданию в эмульсии голограммы совокупности близко расположенных плоскостей, действующих как отражающий фильтр.

С помощью моделирования параметров интерференционных полей в пространстве существует возможность записи голограмм с требуемыми характеристиками (N , n_i и h_i) (1 – 5) [1-3].

С учётом этого принципа для регистрации сигналов АЭ авторами [3] разработан многолучевой интерферометр на основе схемы Фабри – Перо.

Принцип работы виден на схеме (рис. 3). Излучаемый лазером 1 световой поток проходит через линзы объектива 2, 3 и падает на отражательную объёмную голограмму 4. В результате дифракции на голограмме одна часть светового потока образует реконструированное изображение и попадает в плоскость экрана 5, а другая, проходя через голограмму, отражается поверхностью объекта измерений 6, находящегося под нагрузкой 7, и повторно проходит через голограмму в плоскость экрана.

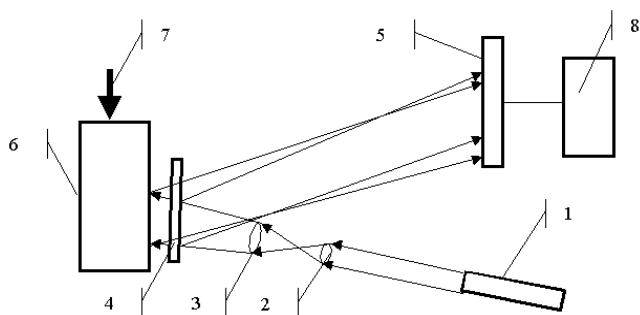


Рис. 3. Схема измерений: 1 – лазер; 2, 3 – линзы объектива; 4 – отражательная голограмма; 5 – экран; 6 – объект контроля; 7 – нагрузка; 8 – регистрирующие устройства, ПЭВМ

Световые потоки от объекта контроля и голограммы интерферируют в плоскости экрана, образуя интерферограмму в виде кольцевых полос максимумов и минимумов интенсивности оптического поля. В плоскости экрана размещаются фотоприёмники, регистрирующие изменения интенсивности оптического поля, вызываемые нормальными к поверхности контроля перемещениями, обусловленными выходом на поверхность упругих волн АЭ. Полученная информация обрабатывается на ПЭВМ 8.

Для регистрации импульсов АЭ может быть использован высокочувствительный фотоприёмник, устанавливаемый в точку центрального максимума (интерференционная полоса нулевого порядка) интенсивности светового потока

интерференционной картины. В данной точке обеспечивается максимальный динамический диапазон d измеряемых перемещений, определяемый при полной смене фазы на π интенсивности светового потока $d = 10 \lg(I_{\max}/I_{\min})$, где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – максимум и минимум регистрируемой интенсивности светового потока.

При использовании нескольких фотоприёмников или фотоматрицы (рис. 3) появляется возможность совместной и интегральной обработки получаемой информации для решения задачи повышения точности измерений, фильтрации и комплексной статистической обработки [3-6].

Использование в разработанном интерферометре объёмной отражательной голограммы в качестве многослойного интерференционного зеркала позволяет до полутора раз повысить его динамический диапазон, может составлять более 15 Дб.

Для такого многолучевого голографического интерферометра распределение интенсивности в прошедшем свете описывается зависимостями [4]:

$$I = I_1 \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad F = \frac{4R}{(1+R)^2}, \quad \varphi = \frac{4\pi \cdot n_0 \cdot l \cos \theta}{\lambda}, \quad (6)$$

где $2l$ – разность хода оптических лучей; θ – угол между направлением луча и нормалью к поверхности голограммы; I_1 – интенсивность падающего света. Регистрируемый прибором на выходе усилителя ток позволяет определить ток

$$i = i_{\max} \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2}}, \quad i_{\max} = I_1 \cdot \alpha \cdot \beta, \quad (7)$$

где α – чувствительность фотоприёмника; β – коэффициент усиления усилителя.

Распределение интенсивности света в интерференционной картине в зависимости от расстояния от её центра – r имеет вид, как показано на рис. 4.

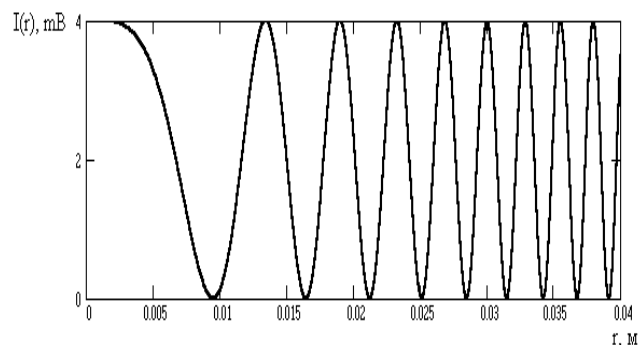


Рис. 4. Распределение интенсивности света в интерференционной картине

Вызванные эмиссией волн напряжений малые перемещения поверхности объекта контроля вызывают изменение разности плеч интерферометра на Δl и тока на Δi

$$\Delta l = \frac{\Delta i \cdot \lambda}{i_{\max} \cdot 2\pi}, \Delta i = i_{\max} \frac{F \sin \varphi \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l}{\left(1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2}\right)^2}. \quad (8)$$

Выражение (8) определяет предел чувствительности измерений (без учёта внешних шумов), нижний предел которых определяется возможностью выделения сигнала из шума.

Экспериментальные графики распределения максимумов амплитуды светового потока в интерференционном максимуме нулевого порядка представлены на рис. 5. Анализ зависимостей позволяет сделать вывод, что используемая в интерферометре объемная голограмма до 40 % увеличивает в центральном максимуме плотность интенсивности оптического поля по сравнению с полупрозрачным зеркалом [4].

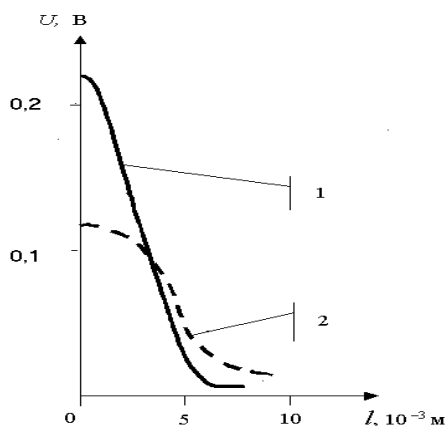


Рис. 5. Графики распределения интенсивности светового потока в центральном максимуме интерференционного изображения: 1 – при использовании голограммы; 2 – при использовании в измерителе полупрозрачного зеркала

Многолучевой голографический интерферометр должен обладать малой базой. Это требование выполняется при использовании полупроводникового лазера. Применяемый для измерений блок регистрации, включающий элементы с 1-4, 6, при использовании в качестве излучателя полупроводникового лазера имеет малые габариты.

Существует возможность определения направления перемещений и перемещений, больших порядка длины волны оптического излучения при обработке получаемой информации, по следующему алгоритму.

В случае, когда градиент амплитуды светового потока в области расположения фотоприемника изменяет знак, то по характеру его изменения (с «+» на «-» или с «-» на «+») определяется направление перемещений. По числу полных изменений амплитуды (соответствующих $\lambda/2$) определяются перемещения, большие порядка длины волны оптического излучателя. Схемы измерений приведены на рис. 6.

Схема, представленная на рис. 3, является базовой для измерений АЭ сигналов разработанным

методом. В зависимости от формы и механических свойств контролируемой конструкции, условий контроля, схема интерферометра может изменяться. Авторами разработаны и прошли экспериментальную отработку следующие схемы многолучевых голографических интерферометров.

Особенностью схемы 2 на рис. 6, а является то, что луч лазера, имеющий сферический фронт, падает на отражательную поверхность конструкции, а затем на отражатели интерферометра.

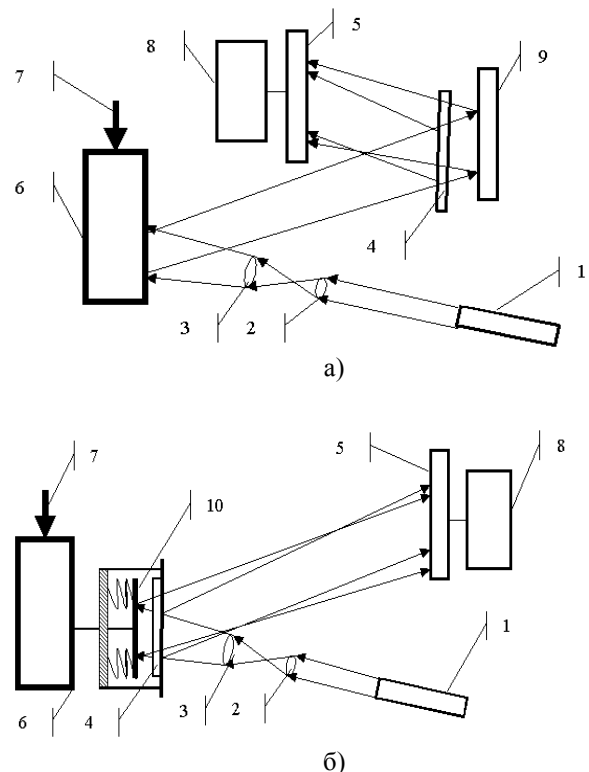


Рис. 6. Схемы измерений: а) схема 2; б) схема 3. Обозначено: 1 – лазер; 2,3 – линзы объектива; 4 – отражательная голограмма; 5 – экран объект контроля; 6 – объект контроля; 7 – нагрузка; 8 – регистрирующие устройства, ПЭВМ, 9 – зеркало; 10 – волновод

Достоинством данной схемы является то, что все элементы схемы интерферометра находятся на удалении от объекта контроля, максимальное расстояние до которого определяется мощностью источника излучения и условиями прямой видимости. Чувствительность схемы 2 на порядок ниже схемы 1 и составляет не менее 10^{-8} м. Данную схему можно рекомендовать для регистрации малых перемещений особо опасных и удаленных объектов.

Схема 3 (рис. 6, б) предназначена для регистрации малых перемещений объектов с диффузной поверхностью. Колебания поверхности ОК передаются по волноводу на зеркало, перемещения которого вызывают изменения разности плеч интерферометра и интенсивности в интерференционной картине. Стабильность и давление акустического контакта волновода обеспечивается пружинами.

Датчик оптической регистрации АЭ сигналов на основе интерферометра, выполненного по схеме

3, может быть использован в труднодоступных местах контролируемой конструкции, на поверхностях сложной геометрии и высокой шероховатости [3] (рис. 7). Исходя из условий затухания сигналов диаметр стержня волновода не должен превышать 3 мм.

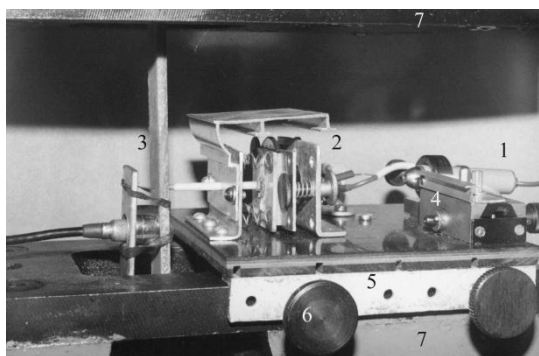


Рис. 7. Голографический интерферометр, используемый при регистрации АЭ сигналов: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – устройство крепления голограммы; 3 – объект контроля (плоский стальной образец); 4 – фотоприёмник; 5 – платформа; 6 – установочные винты; 7 – захваты нагружающего устройства

При проведении измерений разработанным методом существует проблема влияния на результат измерений перемещений поверхности контролируемой конструкции, вызванных внешними механическими шумами (вибрацией, утечками жидкости и газа). Для её решения необходимо разделение спектральных составляющих полезного сигнала и шума с последующей регистрацией сигналов АЭ в рабочей полосе частот. Устройство калибровки пьезодатчиков показано на рис. 8.

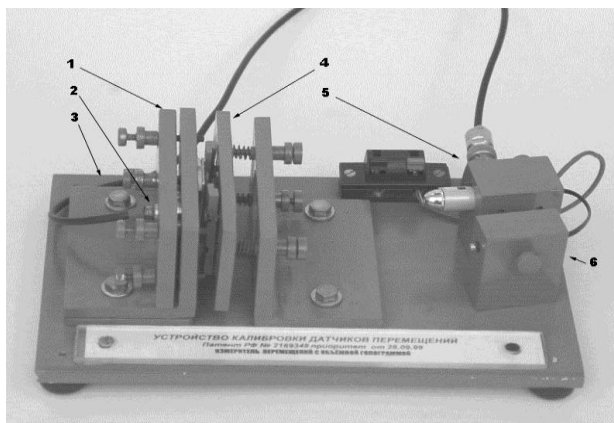


Рис. 8. Устройство калибровки пьезодатчиков: 1 – устройство для установки пьезодатчика; 2 – пьезодатчик; 3 – основание; 4 – устройство для установки голограммы; 5 – полупроводниковый лазер; 6 – фотоприёмник

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наиболее предпочтительным является регистрация АЭ сигналов с помощью лазерного голографического интерферометра, что позволяет достигнуть стабильности АЧХ в широкой полосе частот, существенно повысить динамический диапазон регистрирующего тракта, достоверность и точность АЭ контроля [4-6].

Проведем оценку достоверности регистрации информативных параметров сигналов акустической эмиссии при помощи голографического интерферометра.

Регистрируемые интерферометром сигналы АЭ имеют вид радиоимпульсов с затухающей по экспоненте амплитудой колебаний (диаграмма 1 на рис. 9).

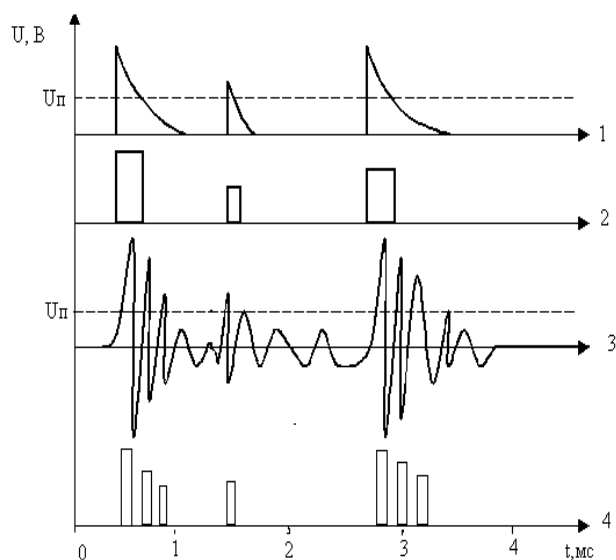


Рис. 9. Импульсы АЭ: 1 – регистрируемые голографическим интерферометром; 2, 4 – сигналы, формируемые АЦП; 3 – регистрируемые пьезопреобразователем

При определении интенсивности потока актов эмиссии путём подсчёта количества импульсов, превышающих порог дискриминации U_n , возникает ситуация, когда одному акту АЭ в материале конструкции может соответствовать несколько импульсов на выходе порогового устройства, число которых определяется амплитудой и условиями распространения сигнала, порогом, резонансными свойствами образца и датчика (рис. 9).

Выходом из этой ситуации может быть подсчёт видеоимпульсов эмиссии после детектирования. Однако при высокой интенсивности следования импульсов на площадке текучести и перед разрушением конструкции видеоимпульсы перекрываются, что приводит к существенным ошибкам в регистрации информативных параметров АЭ.

В данном случае рассматривается метод решения задачи определения t_0 - «мёртвого времени» путём определения вида и параметров амплитудного распределения импульсов эмиссии.

Средняя длительность импульсов $\bar{t}_0$ практически не зависит от порога дискриминации и приблизительно равна τ_0 - постоянной времени послезвучания датчика $\bar{t}_0 \approx \tau_0 / (m-1)$ при $d \gg 1$.

Количественно описать степень перекрытия импульсов позволяет коэффициент перекрытия $K = \sum t_0 / (T - \sum t_0)$.

С учётом этого действительная (восстановленная) интенсивность импульсов $\dot{N}_a = \dot{N}_p \exp K$.

Данные соотношения позволяют количественно определить так называемую информационную достоверность $D_{\dot{N}_a}$ оценки потока актов АЭ - $\dot{N}_a$.

Информационная достоверность связана с определением интервала неопределённости через дезинформационное действие погрешности контролируемого параметра согласно вероятностной теории информации Шеннона.

По определению достоверности имеем $D_{\dot{N}_a} = 1 - \Delta \dot{N}_a$, $D_{\dot{N}_a} = (1 - K)^{-1}$, где $\Delta \dot{N}_a$ - погрешность оценки $\dot{N}_a$.

При регистрации сигналов АЭ лазерным голографическим интерферометром за счёт безинерционности данного метода $\tau_0 \approx 0$. Существенно уменьшаются значения $\bar{t}_0$, т.е. за счёт уменьшения «мёртвого времени» уменьшается K (рис. 10).

Следует, что коэффициент перекрытия при регистрации сигналов пьезопреобразователем существенно возрастает при увеличении интенсивности в процессе деформирования, что существенно уменьшает достоверность АЭ контроля.

При помощи данного подхода количественно определим достоверность оценки суммарного количества актов эмиссии - $N_{\sum}$.

$$D_{N_{\sum B}} = 1 - \Delta N_{\sum B} = 1 - \frac{N_{\sum B} - N_{\sum P}}{N_{\sum B}}, \quad (11)$$

$$= \frac{N_{\sum P}}{N_{\sum B}} = \frac{\int \dot{N}_{a_p}(t) dt}{\int \dot{N}_{a_B}(t) dt}$$

где $D_{N_{\sum B}}$ - достоверность оценки суммарного «восстановленного» количества актов АЭ; $\Delta N_{\sum B}$ - погрешность оценки $N_{\sum B}$; $\dot{N}_{a_p}$ и $\dot{N}_{a_B}$ - регистрируемая и восстановленная интенсивности сигналов.

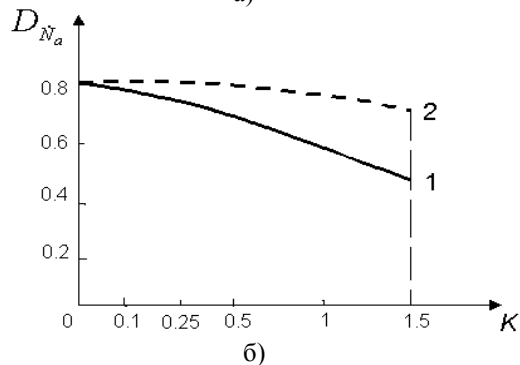
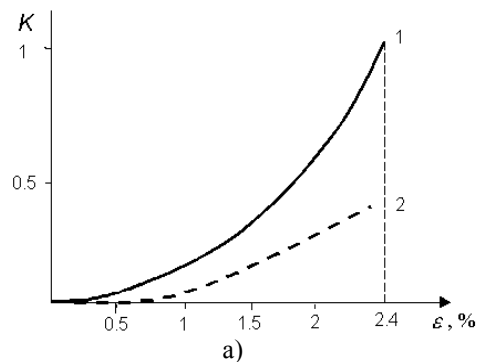


Рис. 10. Зависимости изменения K при деформировании (а) и информационная достоверность оценки интенсивности потока актов АЭ, полученные при разрушении серии образцов из стали 45 (б). Обозначено: 1 - регистрация пьезопреобразователем; 2 - голографическим интерферометром

Ниже приведен пример достоверности оценки суммарного количества актов эмиссии при проведении испытаний серии стандартных цилиндрических образцов из стали 40.

Суммарная эмиссия до разрушения образцов:

- при регистрации интерферометром $N_{\sum P} = 2734$ имп., $N_{\sum B} = 2820$ имп.;
- при регистрации пьезопреобразователем $N_{\sum P} = 2459$ имп., $N_{\sum B} = 2976$ имп.

Достоверность при регистрации интерферометром

$$D_{N_{\sum II}} = \frac{N_{\sum P}}{N_{\sum B}} = \frac{2734}{2820} = 0.93.$$

Достоверность при регистрации пьезопреобразователем

$$D_{N_{\sum II}} = \frac{N_{\sum P}}{N_{\sum B}} = \frac{2459}{2976} = 0.82.$$

Разница более 12 %. Также установлено, что повышение точности регистрации сигналов АЭ за счет использования лазерного голографического интерферометра позволяет более чем на порядок сократить «мёртвое время» от переднего фронта импульса, обусловленное резонансом пьезопреобразователя. Произведя расчеты, сделан вывод о повышении не менее чем на 25 %

достоверности определения информативных параметров метода АЭ [6].

Используемый нами метод определения перемещений при деформации твёрдых тел (элементов конструкций) обладает следующими преимуществами: - обеспечивается высокая точность измерения сигналов эмиссии за счёт использования в схеме интерферометра объёмной голограммы; - ему присуща широкополосность; - при работе имеется возможность осуществлять бесконтактный контроль объектов измерений, проводить калибровку АЭ аппаратуры, оценивать АЭ сигналы в агрессивных средах от поверхностей, не допускающих крепление датчиков и подготовку объектов к контролю.

Выводы. В работе доказаны преимущества неразрушающих методов диагностики элементов сложной техники и контроля состояния объектов, указаны особенности предложенных методов, представлены средства и технологии нового поколения, используемые при диагностике прочностных показателей конструкций посредством регистрации акустико-эмиссионных сигналов при помощи разработанного лазерного голографического интерферометра.

Данная система оценки и контроля позволяет достигнуть стабильности частотных характеристик в широкой полосе частот, что существенно повышает динамический диапазон регистрирующего тракта, достоверность и точность акустико-эмиссионного контроля.

Созданные коллективом авторов способы высокoeffективной акустико-эмиссионной диагностики сложных объектов, средства и приборы

в совокупности с новыми технологическими приемами способов производства техники и многоэтапной технологической наследственности позволяют получать новые, ранее не достижимые результаты.

Литература

1. Лансберг, Г.С. Оптика [Текст] / Г.С. Лансберг. - М.: Наука, 1976. - 927 с.
2. Попов, А.В. Голографический метод регистрации акустико-эмиссионных сигналов при деформации твердых тел [Текст] / А.В. Попов, А.Г. Прыгунов // Дефектоскопия. - 2000. - № 6. - С. 64-69.
3. Попов, А.В. Регистрация малых перемещений при деформации твердых тел голографическим интерферометром [Текст] / А.В. Попов, А.Г. Прыгунов // Известия вузов. Сер. Приборостроение. - 2001. - № 2. - С. 50-55.
4. Попов, А.В. Оценка опасности дефектов конструкций по данным бесконтактного акустико-эмиссионного неразрушающего контроля [Текст] / А.В. Попов // Автотестирование. - 2001. - № 1. - С. 84-87.
5. Пат. № 2169348 Российская Федерация, МПК ⁷ G01B9/021, G01C22/00. Измеритель перемещений с объёмной голограммой [Текст] / Паринов И.А., Прыгунов А.Г., Рожков Е.В., Трепачев В.В., Попов А.В.; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики Ростовского государственного университета. - № 99120531/28; заяв. 28.09.1999; опубл. 20.06.2001, Бюл. № 17.
6. Методы определения эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций вооружения и военной техники на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов [Текст] / А.В. Попов, В.Н. Старов, Д.Е. Барабаш, С.Ю. Жачкин // Вестник ВАИУ. - 2012. - № 1 (15). - С. 28-36.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Воронежский институт ГПС МЧС России
Воронежский государственный технический университет

FEATURES DESIGN PROCESS FACILITIES BOUND TO GENERATE NEW NON UNPARALLELED TECHNICAL SOLUTIONS

G.V. Zibrov, V.N. Starov, E.V. Smolentsev, A.V. Popov

This article shows the principles of the formation of variants of design decisions and choosing optimal directions to ensure the generation of new technical solutions. This system allows you to reach a stability of frequency characteristics in a wide frequency band, which significantly increases the dynamic range of the recording channel, the reliability and accuracy of acoustic emission monitoring

Key words: design solutions, multicriteria evaluation, technology

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ПО ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

А.П. Суворов, А.В. Кретинин, А.В. Кузовкин

В статье рассмотрена технология проектирования и изготовления инструмента для электрофизических методов обработки с использованием САПР и технологии Rapid Prototyping

Ключевые слова: электрофизическая обработка, электроинструмент, быстрое прототипирование

В современном машиностроении наблюдается тенденция к усложнению форм, что обуславливается рядом причин (конструктивные особенности, прочностные и массогабаритные характеристики, показатели эргономики и эстетики).

Сложнопрофильные поверхности современного машиностроения можно условно разделить на основе геометрии профиля:

- поверхности, подчиненные математическим уравнениям, определенной формы и с определенным расположением в пространстве;
- поверхности, форма которых определяется отдельными точками, а координаты этих точек заданы в виде чисел, обычно сведенных в таблицу, называемые поверхностями с числовыми отметками;
- поверхности, форма которых определяется конструктивной необходимостью, называемые конструктивными.

Классификацию поверхностей в технике можно представить в следующем виде (рис. 1).

Процесс усложнения геометрических форм промышленных объектов наблюдается на всех периодах становления промышленного производства. Однако в настоящее время он приобрел наиболее интенсивный характер, что обуславливается следующими значащими факторами:

- работы в области теории прочности показали возможность повышения прочностных свойств деталей и изделий в целом за счет повышения "степени кривизны поверхности". Под кривизной поверхности в данном случае пони-

мается математическое определение гладкости между двумя кривыми и поверхностями;

- конструктивные особенности детали, механизма, устройства или изделия в целом, обусловленные функциями, на достижение которых направлено его создание;
- эстетическими особенностями детали обусловлены приданием оригинального внешнего вида при проектировании для придания большей выразительности и привлекательности.



Рис. 1. Классификация поверхностей

Анализ криволинейных сложнопрофильных поверхностей, обработка которых осуществляется в современном машиностроительном комплексе, показывает, что действительно существует разновидность деталей, часть поверхностей которых имеет настолько сложную геометрию, что их можно вывести в отдельную группу, обозначив для нее характерные признаки. Критерием их оценки, по данным литературы, следует считать гладкость кривой, которая традиционно получила обозначение G , за которой следуют числа:

непрерывность G0 (точка) означает, что конечные точки соприкасаются. Переход между двумя ребрами или поверхностями является заметным. Это может быть резкий или постепенный переход;

непрерывность G1 (касательная) - плавный переход между кривыми. Две кривые или поверхности движутся в одном направлении в месте соединения, но коэффициент изменения кривизны (скорость) является заметным;

непрерывность G2 (кривизна) - очень плавный переход между кривыми. Две кривые совпадают в конечных точках, являются касательными и имеют одинаковую "скорость" (кривизну) при соединении.

В современном машиностроении существует большое количество объектов со сложнопрофильными поверхностями (фрезерная обработка, абразивная обработка, литье, методы электрохимической обработки), но большинство из них либо требует в дальнейшем финальной обработки или же достаточно больших экономических вложений.

В настоящее время все большую популярность получают электрофизические и электрохимические методы обработки. Широкое использование данных методов обработки в промышленности обусловлено их высокой производительностью, возможностью выполнять технологические операции, недоступные механическим методам обработки.

Электрическая обработка включает в себя электроэрозионные, электрохимические, комбинированные электроэрозионно-химические и электромеханические способы обработки (рис. 2).

При электроэрозионных способах обработки съём металла и изменение свойств поверхности детали являются результатом термического действия электрического тока. Наиболее перспективной технологией финишной обработки сложнопрофильных поверхностей в условиях единичного производства являются электрические методы. Однако их использование ограничено трудностями проектирования и изготовления собственно ЭИ на этапе технологической подготовки производства.

Кроме традиционных методов изготовления электрода-инструментов, таких как фрезерование, точение и слесарная обработка, существуют методы, которые значительно снижают трудоемкость изготовления и стоимость ЭИ. К ним относятся методы:

- вихревого копирования;
- порошковой металлургии;

- гальванопластика и металлизация напылением.

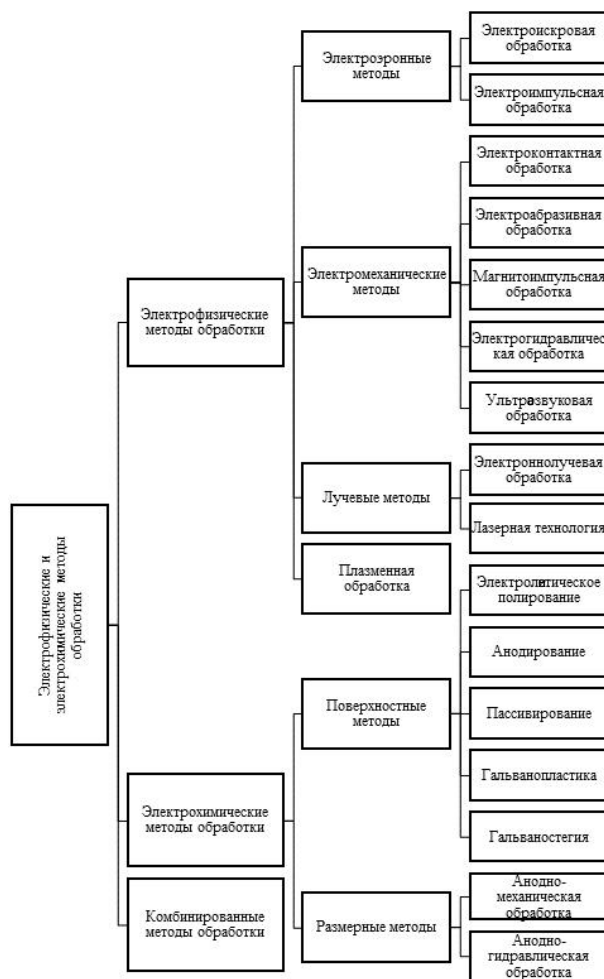


Рис. 2. Электрические методы обработки Поверхностей

Эти методы часто используются для изготовления электрода-инструментов для серийного производства, но они часто требуют ручной слесарной доводки, имеют низкую электроэрозионную стойкость ЭИ или дают неравномерность толщины и плотности осажденного металлического слоя.

В настоящее время одной из перспективных технологий создания сложнопрофильных поверхностей является технология быстрого прототипирования (RapidPrototyping – RP). Которая основывается на послойном создании физического объекта на основе математической модели. В отличие от традиционных методов производства быстрое прототипирование изделий не предусматривает удаление материала (фрезеровка, сверление, стачивание) или изменение его формы (штамповка, ковка, изгиб, раскатывание). Особенность технологии снимает все ограничения на внутреннюю структуру получаемой модели.

Быстрое прототипирование как технология включает несколько этапов и начинается с создания математической модели изделия, а заканчивается процессом создания готовой модели с использованием одной из возможных методик. Математическую модель можно создать в любой программе трехмерного моделирования и сохранить в одном из форматов *.STL, *.WRL, *.PLY, *.3DS. После создания модели происходит ее печать на специальном принтере. Однако если существует образец детали, то этап создания математической модели можно опустить, а образец использовать в качестве модели при изготовлении силиконовой оснастки.

Следовательно, имея возможности 3D печати, низкий износ ЭИ в процессе работы и возможность нанесения токопроводящего покрытия на ЭИ, выращенный из нетокопроводящих и дешевых материалов, открывается возможность изготовления ЭИ под любую деталь с какой угодно кривизной поверхности.

В качестве примера можно рассмотреть возможность финишной обработки замковой части лопаток рабочего колеса магистрального насоса, проектирование которого осуществляется в рамках проекта, выполняемого совместно ФГБОУ ВГТУ и ОАО "Турбонасос". Особенностью этого проекта является то, что на предприятии создается "Проектно-технологический комплекс" по договору №1450/300-13 от 24.02.2013 "Создание высокотехнологичного производства магистральных нефтяных насосов нового поколения с использованием методов многокритериальной оптимизации и уникальной экспериментальной базой". В основе этого комплекса лежит идея сквозной проработки конструкции агрегатов и узлов магистральных нефтяных насосов типа МНН со сменными роторами производительностью от 1250 м³/ч до 12500 м³/ч и напором от 210 до 260 м. Работа организуется на базе ПАМ (программно-аппаратных модулей), каждый из которых представляет собой одно или несколько рабочих мест конструкторов-проектировщиков, оснащенных специализированным программным обеспечением.

Конструкция основного рабочего органа (рабочего колеса) прорабатывается в наиболее популярной у инженеров-проектировщиков подобного оборудования САПР ANSYS, позволяющей получать геометрию профиля пера лопатки и рабочего колеса в целом в зависимости от требуемых технических параметров готового изделия. Полученная геометрия характеризует-

ся значительной кривизной и может быть описана кривыми 2-го и 3-го порядка (рис. 3).

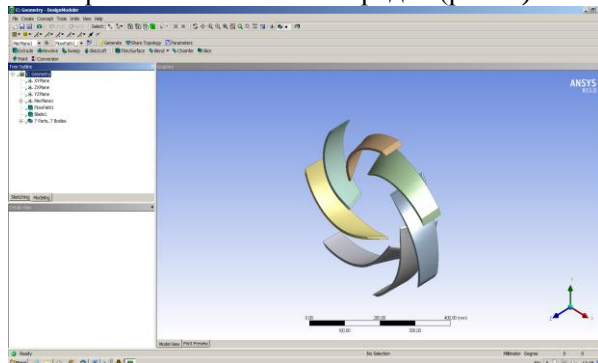


Рис. 3. Пример геометрии пера лопатки рабочего колеса МНН, полученной на этапе проектирования в ПАМ "Гидравлика"

В дальнейшем работа с геометрией пера лопатки и собственно рабочего колеса осуществляется в ПАМ-ах "Конструкция", "Механика" и "Сборка". Эти ПАМ-ы организованы на специализированном программном обеспечении Autodesk Inventor Professional, который позволяет разрабатывать "цифровой прототип детали", осуществлять проектирование сборочных и формообразующих операций.

Наличие в Autodesk Inventor Professional встроенного модуля iLogic позволяет существенно повысить уровень автоматизации процесса проектирования инструмента для процесса формообразования, особенно поверхностей со сложной геометрией. Технология iLogic заключается в проектировании на основе правил, устанавливаемых пользователем или проектировщиком. Модуль iLogic внедряет правила в виде объектов непосредственно в деталь, сборку и документы чертежей. Эти правила определяют значения параметров и атрибутов для проекта, а также управляют ими. В частности, к таким параметрам можно отнести величину межэлектродного зазора (МЭЗ) и толщину токопроводящего покрытия на электродеинструменте (ЭИ). Управляя этими значениями, можно определять поведение атрибутов, элементов и компонентов модели и проектировать инструмент для формообразования еще на этапе создания собственно цифрового прототипа готовой детали. Значения и правила iLogic сохраняются непосредственно в файле модели и находятся там аналогично тому, как хранятся элементы геометрии проектируемой детали.

В правилах iLogic можно использовать пользовательские типы параметров, которые назначаются конструктором/проектировщиком исходя из конкретных условий проектирования/обработки, причем в качестве входных зна-

чений используются не только численные, но и логические значения.

Эти специализированные параметры поддерживаются в диалоговом окне "Параметры Autodesk Inventor", где содержатся расширенные функции фильтрации, упрощающие определение и редактирование параметров, а также управление ими.

К основным функциям автоматизации iLogic, которые могут быть использованы конструкторами/технологами в указанных ситуациях, относятся:

- автоматический поиск и изменение конфигурации параметрических деталей или сборок на основе условного оператора, определенного в правилах на уровне сборки;
- активизация элементов деталей или сборок, а также компонентов и зависимостей сборок на основе правил с использованием условных аргументов (особенно применимо для случая проектирования ЭИ с целью учета толщины токопроводящего покрытия и величины МЭЗ);
- обновление сведений в спецификации на ЭИ, если изменения модели детали приводят к новой конфигурации ЭИ и соответственно величин МЭЗ и толщин покрытия;
- ограничение или автоматическая коррекция вводимых значений таким образом, чтобы итоговые конфигурации ЭИ были допустимы и соответствовали теоретическим положениям электрических методов обработки.

На основе изложенных выше правил автоматически была разработана технология проектиро-

вания электродов-инструментов для финишной обработки "замковой части" лопатки рабочего колеса исходя из его цифрового прототипа и с учетом теоретических положений электрических методов обработки по расчету МЭЗ и толщины токопроводящего покрытия (рис. 4).

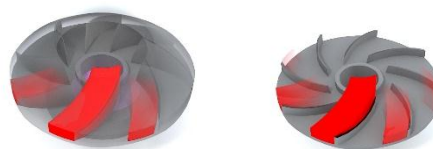


Рис. 4. Пример построения геометрии рабочей части электрод-инструмента для финишной обработки замковой части пера лопатки рабочего колеса

Литература

1. Данилевский В.В. Технология машиностроения [Текст]: учебник для техникумов / В.В. Данилевский. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1984. - 417 с.
2. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов [Текст]: учеб. пособие / Е.Ф. Немилов. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1983. - 160 с.
3. Татаринов Г.К. Справочник слесаря-сборщика [Текст] / Г.К. Татаринов, Н.И. Санжаревский. - Харьков: Прапор, 1978. - 144 с.
4. Кузовкин А.В. Разработка технологии изготовления фасонного инструмента на основе быстрого прототипирования [Текст] / А.В. Кузовкин, А.П. Суворов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10, № 1. - С. 35-37.
5. Технологические возможности комбинированных и аддитивных процессов в формообразовании проточных поверхностей гидрооборудования [Текст] / А.В. Кузовкин, Г.А. Сухочев, А.О. Родионов, А.П. Суворов // Насосы. Турбины. Системы. - Воронеж, 2014. - № 1 (10). - С. 53-60.

Воронежский государственный технический университет

METHOD OF MANUFACTURING COMPLEX-TOOL ELECTRODE TECHNOLOGY RAPID PROTOTYPING

A.P. Suvorov, A.V. Kretinin, A.V. Kuzovkin

The article describes the design and manufacture of technology tools for electro-processing techniques for using CAD technology and Rapid Prototyping

Key words: electrophysical processing, electromechanical Instrument, Rapid Prototyping

ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОДГОТОВЛЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКИМ СПОСОБОМ ПОВЕРХНОСТИ ПОД ЛАКОКРАСОЧНОЕ ПОКРЫТИЕ

Ю.П. Земсков, Ю.С. Ткаченко

Представлены результаты количественной оценки зависимости площади отслоившегося лакокрасочного покрытия от шероховатости металлической поверхности после абразивно-струйной обработки

Ключевые слова: шероховатость, абразивно-струйная обработка, адгезия, площадь отслоившегося покрытия

Конструкции машин, выполненные из металлических листов, должны быть покрыты защитным покрытием, в основном, из лакокрасочных материалов для повышения стойкости к коррозии. От качества подготовки подложки зависит адгезия лакокрасочного покрытия.

Целью настоящих исследований является количественная оценка шероховатости поверхности, подвергнутой абразивно-струйной обработке, для повышения адгезии лакокрасочного покрытия к металлической основе.

Поставленная цель предполагает решение двух задач: во-первых, получение оптимальных режимов проведения абразивно-струйной обработки и, во-вторых, получение количественной оценки шероховатости поверхности, при которой адгезия лакокрасочного покрытия будет максимальной. На первом этапе методом планирования эксперимента была получена модель, дающая зависимость глубины проникновения абразива в металлическую поверхность (шероховатость) от основных технологических режимов.

На рис. 1-5 показаны зависимости глубины отпечатка от абразива Δh от технологических режимов.

Анализ зависимости (рис. 1) показал, что наличие на кривой максимума говорит о существовании оптимальной длины разгона абразивных частиц от среза абразивного пистолета до обрабатываемой поверхности. Спадающая ветвь кривой объясняется уменьшением плотности потока абразива. При малых дистанциях обработки абразивные частицы не успевают набрать максимальную скорость, и поэтому углубление отпечатка будет не большим.

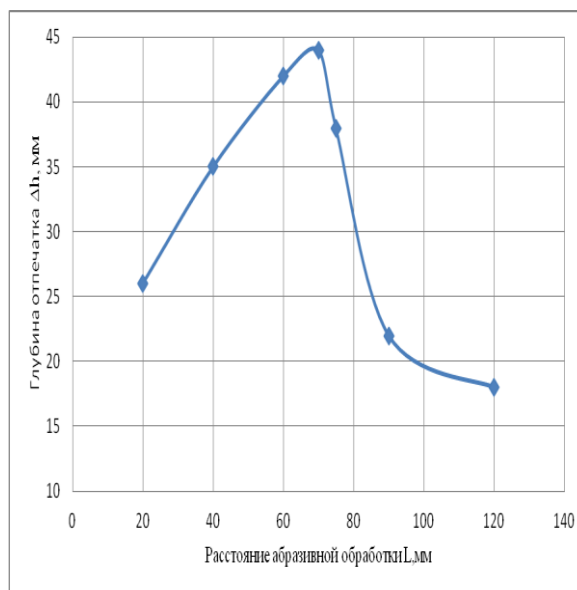


Рис. 1. Зависимость глубины отпечатка от абразива Δh от расстояния абразивной обработки L

На рис. 2 показана зависимость глубины отпечатка от размера абразива (дисперсность).

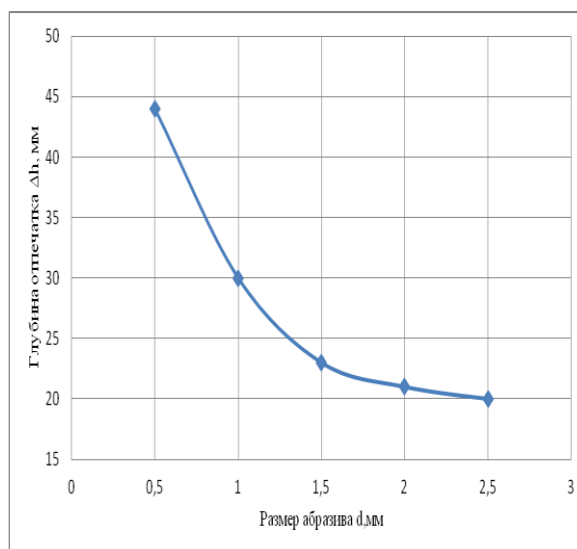


Рис. 2. Зависимость глубины отпечатка от размера абразива

Так, из рис. 2 видно, что уменьшение глубины отпечатка Δh при увеличении дисперсности абразива d можно объяснить уменьшением величины удельного давления при воздействии абразивных частиц на обрабатываемую поверхность.

Зависимости глубины отпечатка Δh от давления в пневмосистеме P и времени обработки t имеют односторонний линейный характер (рис. 3 и 4).

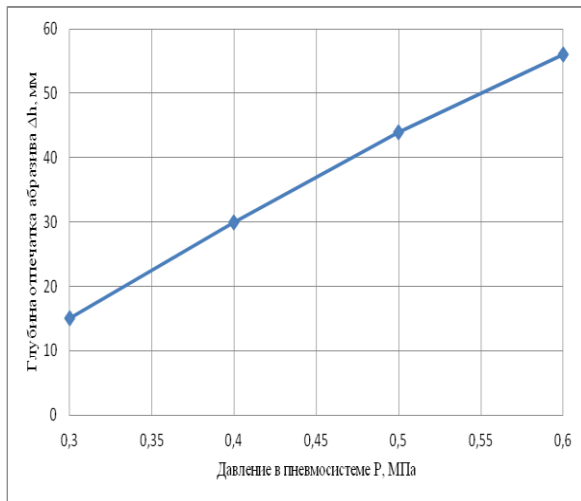


Рис. 3. Зависимость глубины отпечатка абразива Δh от давления в пневмосистеме P

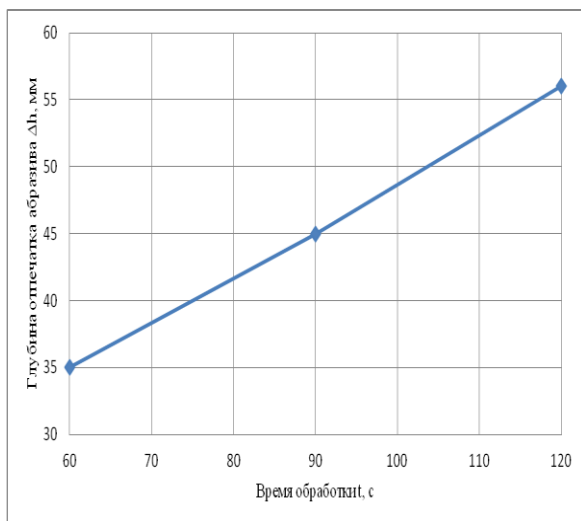


Рис. 4. Зависимость глубины отпечатка абразива Δh от времени обработки t

Качественный анализ результатов эксперимента по выявлению зависимости глубины отпечатка Δh от давления в пневмосистеме P и времени обработки t увеличивается с повышением указанных технологических параметров. Это объясняется возрастанием скорости v абразивных частиц,

которая связана с давлением в пневмосистеме зависимостью:

$$v = \sqrt{\frac{2P}{\rho a}}, \quad (1)$$

где P – давление в пневмосистеме;

ρ – плотность энергоносителя (воздуха);

a – суммарный коэффициент потерь абразивных частиц, обладающих кинетической энергией, совершающей работу по деформации поверхности.

На рис. 5 показана зависимость глубины отпечатка Δh от угла обдува (атаки) абразивной струи α .

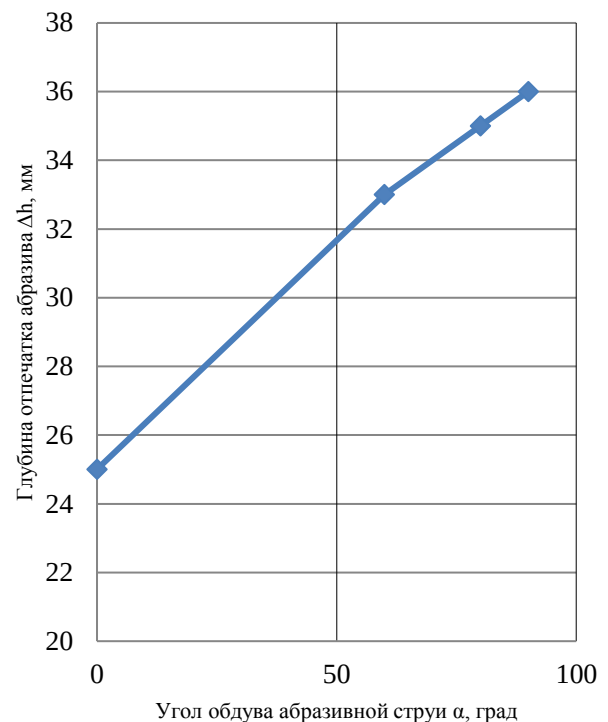


Рис. 5. Зависимость глубины отпечатка абразива Δh от угла обдува абразивной струи α

Максимум на кривой (рис. 5) объясняется преобладанием в интервале углов атаки $\alpha=80...85^\circ$ процесса абразивного изнашивания. Причины увеличения глубины проникновения от абразивных частиц можно отнести к различным составляющим силы удара.

Методом планирования эксперимента была получена математическая модель, отражающая зависимость глубины отпечатка абразива Δh от технологических режимов:

- дистанция обработки – X_1 ;

- размер абразива – X_2 ;
- давление в пневмосистеме – X_3 ,
- время обработки – X_4 ;
- угол атаки абразивной струи – X_5 .

После проверки на адекватность уравнение регрессии имело вид:

$$\Delta h = 30,73 - 5,28 X_1 - 5,28 X_2 - 12,23 X_3 + 8,21 X_4 - 1,43 X_5 - 3,41 X_2 X_3 - 3,03 X_2 X_4 + 5,78 X_3 X_4 + 1,43 X_4 X_5. \quad (2)$$

В результате получены оптимальные режимы проведения абразивно-струйной обработки:

- давление в пневмосистеме – 0,5 МПа;
- дистанция обработки – 60 мм;
- время обработки – 60 с;
- дисперсность абразива – 0,5 мм;
- угол атаки – 80° [1].

В качестве абразива использовался оксид алюминия [2].

На втором этапе в соответствии с [3] была получена количественная оценка адгезии лакокрасочного покрытия в баллах.

В качестве оценочного параметра выступала площадь отслоившегося покрытия.

По результатам эксперимента была получена фактическая картина состояния поверхности после абразивно-струйной обработки в виде впадин (лунок), которая представлена на рис. 6.

Как видно, поверхность представляет собой сильно развитую поверхность, где $\sum N_{\text{л}}$ – это суммарное количество лунок на фиксированной площади обработки.

Обработка результатов испытаний адгезии σ лакокрасочного покрытия основана на зависимости адгезии от интегральной площади контакта покрытия с основой:

$$\sigma = \int_s k dS, \quad (3)$$

где k – параметр функции, зависящий от шероховатости R_a подготовленной поверхности $k = f(R_a)$.

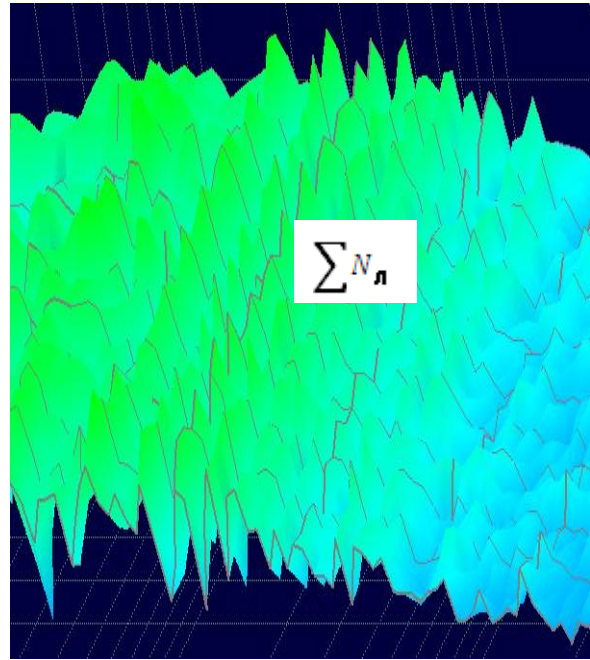


Рис. 6. Фактическая картина шероховатости металлической поверхности после абразивно-струйной обработки на оптимальных режимах

$$\text{Тогда } f(R_a) = \frac{d\sigma}{dS}. \quad (4)$$

Для листового металла толщиной 0,8...1,2 мм адгезия лакокрасочного материала осуществляется по площади, отслоившегося от основы покрытия.

Исходя из зависимости, полученной в результате эксперимента, имеем, что адгезия без отслоений лакокрасочного покрытия наблюдается в интервале шероховатости R_a от 30 до 50 мкм. Это означает, что отслоения будут проявляться при шероховатости подготовленной поверхности менее 30 мкм.

Так, при R_a больше 50 мкм требуется больше лакокрасочного материала, чтобы выровнять собственную шероховатость, что связано с большим перерасходом краски. Кроме того, получение слишком большой шероховатости связано с тем, например, что при толщинах менее 1 мм листовой металл приобретает деформированный характер, что совершенно не допустимо с точки зрения конструктивных особенностей.

Таким образом, была получена аналитическая зависимость площади отслоившегося лакокрасочного покрытия $S_{\text{отсл}}$ как показатель адгезии от шероховатости металлической поверхности, подвергнутой абразивно-струйной обработке:

$$S_{\text{отсл}} = S - 2A \cdot N \cdot h, \quad (5)$$

где A – коэффициент;
 N_d – количество лунок на фиксированной поверхности;
 h_d^2 – глубина лунки. При определенных допущениях $h = R_a = 80 \dots 100$ мкм.

Аналитическая зависимость площади отслаивания лакокрасочного покрытия от глубины отпечатка абразива показывает, что чем больше второе слагаемое в представленном уравнении, тем меньше будет площадь отслаивания. Следует иметь в виду, что зависимость площади отслаивания от шероховатости поверхности носит экспоненциальный характер. Тогда следует производить выбор шероховатости в зависимости от толщины применяемого металла. Выбор оптимального значения шероховатости следует производить из графика, представленного на рис. 7.

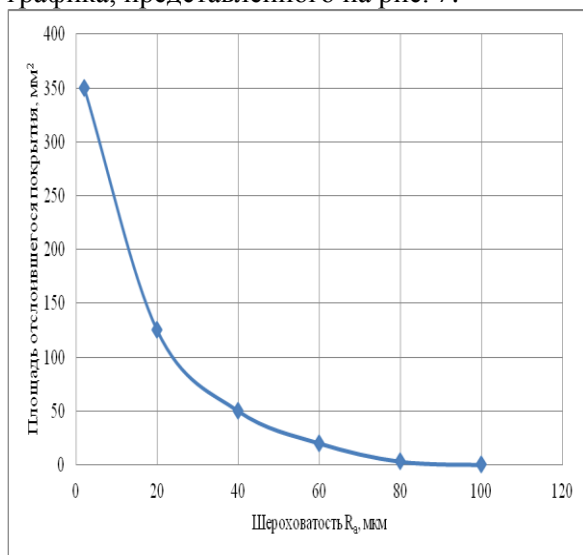


Рис. 7. График зависимости площади отслоившегося покрытия от шероховатости металлической поверхности, подвергнувшейся абразивно-струйной обработке

Анализ графика показывает, что минимальная площадь отслаивания лакокрасочного покрытия при толщинах металлического листа $0,8 \dots 1,2$ мм будет наблюдаться при шероховатости $R_a = 80 \dots 100$ мкм.

Таким образом, была выполнена задача по оптимальному выбору технологических режимов абразивно-струйной обработки металлической поверхности и достигнута поставленная цель – получена количественная оценка шероховатости поверхности, подвергнутой абразивно-струйной обработке, для повышения адгезии лакокрасочного покрытия к металлической основе.

Литература

1. Тутуков В.Н. Влияние факторов дробеструйной обработки на состояние поверхности [Текст] / В.Н. Тутуков, Ю.П. Земсков, М.В. Эфрон // Улучшение свойств материалов для машин сельскохозяйственных машин: сб. науч. трудов. - Воронеж: ВСХИ, 1988. - С. 97 – 103.
2. ГОСТ 28844-90. Покрытия газотермические упрочняющие и восстанавливающие. Общие требования. - М.: Изд-во стандартов, 2005. – 10 с.
3. ГОСТ Р 54563-2011 (ИСО 2409:2007). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза. - М.: Стандартинформ, 2014. – 10 с.

Воронежский государственный университет инженерных технологий
Воронежский государственный технический университет

ASSESSMENT OF THE ROUGHNESS OF THE SURFACE PREPARED MECHANICALLY UNDER THE PAINT AND VARNISH COVERING

Y.P. Zemskov, Y.S. Tkachenko

Results of a quantitative assessment of dependence of the area of an exfoliating paint and varnish covering from a roughness of a metal surface after abrasive and jet processing are presented

Key words: roughness, abrasive and jet processing, adhesion, the area of an exfoliating covering

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев

Рассмотрено целевое назначение и классификация традиционных и новых (на уровне изобретений) методов модификации поверхностного слоя металлических изделий. Исследованы возможности управления свойствами слоя для повышения эксплуатационных показателей объектов производства, в том числе прочности, долговечности, товарного вида. Показаны возможности расширения спроса изделий с покрытием за счет повышения качества изделий с модифицированным поверхностным слоем

Ключевые слова: модификация, поверхностный слой, качество изделий, управление свойствами поверхностного слоя

Эксплуатационные характеристики изделий зависят от состояния поверхностного слоя материала. Для объектов машиностроения новых поколений требуется получить прочностные и эксплуатационные показатели, совмещающие полезные свойства различных слоев изделий, такие как: высокая твердость, механические свойства при минимальной массе объекта, высокая степень защиты от коррозии при хорошей адгезии, что в ряде случаев считается неосуществимым даже при замене металлов на композиционные материалы (например, углеграфиты, стеклопластики).

Одним из основных направлений исследований в машиностроении является создание поверхностных слоев, обладающих требуемыми эксплуатационными показателями при сохранении полезных свойств основного материала, например, высокой теплостойкостью при применении легких сплавов с низкой температурой плавления.

В этом направлении в последние годы ведутся интенсивные исследования, включающие тенденции развития в области формирования поверхностного слоя:

- удаление поверхностного слоя (полностью или частично);

- целенаправленное изменение состава и свойств поверхностного слоя для улучшения технологических характеристик изделий с покрытиями в направлении повышения эксплуатационных свойств до уровня, достигнутого в настоящее время. Дальнейшие исследования в этом направлении способствуют получению показателей, близких

к теоретическим пределам прочностных и других характеристик материалов с покрытиями;

- нанесение покрытий, обеспечивающих получение требуемых эксплуатационных показателей всей детали и дающих наибольший выигрыш от научно-обоснованного сочетания покрытия с основным металлом (требуемый ресурс, надежность, работоспособность и другие характеристики);

- придание изделию или его части специфичных свойств. К ним относятся теплозащита, теплостойкость, отражательная способность, тепло- и электропроводность, защита от коррозии и анодного растворения при воздействии электрического поля и др. Целью таких исследований может являться расширение технологических возможностей машин-строения, повышение прочностных и других свойств изделий (особенно вновь создаваемых наукоемких объектов транспортной техники), улучшение потребительских показателей (внешнего вида, эргономики, эстетики и др.), повышение эффективности восстановления и ремонта изделий, в том числе без их разборки.

Классификация методов модификации

В основу классификации технологических приемов для получения требуемых эксплуатационных свойств изделий с модифицированным поверхностным слоем положены требования к назначению объектов. Это может быть удаление дефектного слоя, изменение химических и физических характеристик в поверхностных зонах, передача части требований к детали на наносимое покрытие в виде однородного слоя или с включением гранул, закрепляемых на поверхности материала в зоне воздействия эксплуатационных факторов. Целевое назначение всех видов покрытий достаточно

Сафонов Сергей Владимирович – ВГТУ, канд. пед. наук, профессор, тел. (473) 246-29-90, e-mail: safonov@vorstu.ru
Григорьев Сергей Николаевич – МГТУ (СТАНКИН), д-р техн. наук, профессор, тел. 8-499-972-94-00, e-mail: rector@stankin.ru

Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-903-655-99-70, e-mail: vsmolen@inbox.ru

близко, однако при их выборе следует учитывать ограничения по возможностям и эффективности процесса нанесения, вторичные факторы, изменяющие условия эксплуатации (например, утрату металлического контакта между токопроводом и заготовкой).

Применяемые способы модификации поверхностного слоя зависят от наличия технических средств, обеспечивающих выполнение операций по модификации,

целесообразности изменения свойств детали силами своего производства, степени освоения новой технологии, ряда организационных факторов. Для повышения эффективности применяемого способа модификации требуется создать систему многофакторной оптимизации выбора рационального способа совершенствования эксплуатационных характеристик поверхностного слоя, определяющих требуемые показатели изделия.

Таблица 1

Способы получения поверхностного слоя с требуемыми свойствами

№ п/п	Основное назначение	Эксплуатационные требования	Основные способы модификации поверхностного слоя	Источники информации (литература)
1	2	3	4	5
1	Восстановление исходных свойств изделия со снятием припуска	Восстановление качества поверхностного слоя	Удаление дефектного слоя методами: - механической обработкой	[13, 22, 23, 26, 28]
			- вибрационными	[24, 25]
			- комбинированными с наложением электрического поля	[14, 19, 27, 28]
2	Управляемое изменение свойств изделия без удаления припуска	Повышение эксплуатационных и потребительских свойств изделий	Изменение свойств слоя методами: - термический и химико-термический	[22, 23]
			- виброударный	[11, 20]
			- комбинированный с наложением электрического поля	[15, 21, 27]
3	Управляемое изменение свойств изделия с нанесением слоев	Улучшение эксплуатационных показателей изделий	Нанесение: - металлических тонких и толстых покрытий (гальваника, напыление и др.)	[16, 17, 19, 22, 23, 26, 27]
			- толстослойных покрытий (напыление, наплавка, электроэрозионное покрытие и др.)	[16, 17, 18, 21, 22, 23, 26, 27, 29]
			- диэлектрических покрытий (лаки, краски, полимеры и др.)	[22, 23, 26]
4	Придание изделиям особых характеристик, определяемых свойствами структурных составляющих покрытий	Повышение жаростойкости, жаропрочности, износостойкости, отражательной способности, тепловых, механических, электрических, оптических характеристик	Комбинированное нанесение покрытий: - сочетанием металлов с различными свойствами	[18, 21, 27]
			- комбинированными методами	[18, 26, 27]

Основные способы модификации приведены в табл. 1. Следует учитывать, что направленное изменение свойств поверхностного слоя может принципиально изменить (как правило, улучшить) возможности создания как всего изделия, так и его элементов, а в ряде случаев становится основным фактором при реализации создания работоспособной, востребованной техники новых поколений, определяющих научный

прогресс и приоритеты государства в области машиностроения, особенно в его наукоемких отраслях.

В табл. 1 приведены основные источники информации из литературы, список которой имеется в конце статьи. Механическая обработка достаточно подробно исследована в учебной, справочной литературе и описана в монографиях. Большой интерес представляют нетрадиционные методы обработки, в

частности, формируемые путем комбинации тепловых, магнитных, химических и механических воздействий (раздел 1 в табл. 1).

Рассмотрим некоторые, ранее мало известные, способы модификации свойств поверхностного слоя материала. По табл. 1, раздел 1 для обеспечения съема припуска и создания требуемой шероховатости каналов вибрационным методом предложен способ обработки по патенту [1], где чистовой съем припуска межлопаточных каналов в деталях типа «турбина» выполняется в контейнерах методом продавливания рабочей среды при частоте колебаний зоны обработки до 50 Гц с амплитудой не более величины межэлектродного зазора. Схема обработки приведена на рис. 1.

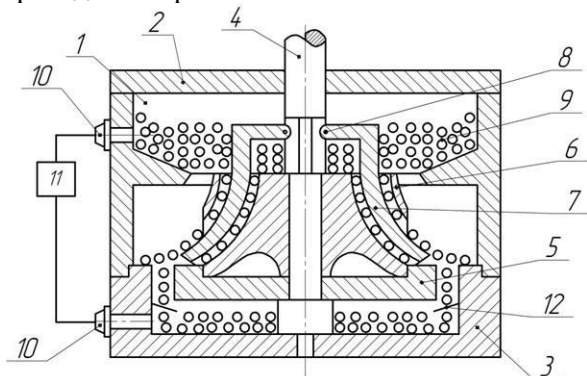


Рис. 1. Схема вибрационной обработки каналов, 1 – контейнер; 2 – крышка контейнера; 3 – емкость для рабочей среды; 4 – вал привода; 5 – базовая опора для заготовки 6; 7 – твердосплавные вставки, установленные на поворотном узле 8; 9 – жидкая рабочая среда с твердым наполнителем; 10 – штуцеры для подачи и удаления рабочей среды, поступающей от насоса 11; 12 – расходомеры для регулирования в контейнере рабочей среды

Технология обработки по рис. 1 имеет следующие этапы:

- подготовительный, включающий базирование заготовки на опорах в контейнере, установку вставок, заполнение емкости рабочей средой, герметизацию контейнера крышкой, расчет (или назначение) технологических режимов;

- регулировка установки: замер высоты заполнения контейнера по нижнему штуцеру; контроль частоты вибраций контейнера; соотношение объемов контейнеров рабочей среды: каучуковой массы и металлических шаров (рекомендуется 1:3 по весу); скорости прохождения массы между штуцерами (регулируют за счет амплитуды 0,2 – 0,8 мм); времени обработки (зависит от величины съема припуска);

- оценка результатов. Измеряют шероховатость, равномерность съема припуска.

Наиболее часто для восстановления свойств материала используются комбинированные методы обработки с наложением электрического поля.

По патенту [2] для получения качественной исходной поверхности изделий металлургического передела для последующей переработки предложено использовать электрод-щетку, которую на первом этапе обработки нагревают до температуры обрабатываемого материала, после чего удаляют неровности и местные дефекты под током в газожидкостной слабопроводящей среде.

Созданы технологические процессы, позволяющие изменять свойства поверхностного слоя без удаления припуска (табл. 2).

Таблица 2

Поверхностная обработка без удаления припуска (съем материала находится в пределах допуска на размер детали)

№ п/п	Назначение операции	Основные методы обработки	Источник информации
1	2	3	4
1	Снятие поверхностных напряжений	Термическая, химико-термическая обработка, травление	[13, 22, 23, 26]
		Скругление кромок переходных участков	[3]
2	Повышение твердости и стойкости режущей части инструмента	Термическая, химико-термическая обработка, напыление	[22, 26]
		Лучевые методы (плазма, лазер)	[4]
		Термохимическая импульсная обработка	[5, 15]
3	Создание локального наклепанного слоя	Механическая виброударная обработка	[22, 16, 20]
		Комбинированные импульсные воздействия в электрическом поле	[6, 7, 8]
4	Защита металлических изделий (оснастки) от анодного растворения	Пассивация поверхности тонким покрытием	[9]
		Химическая пассивация	[10, 11]

По патенту [3] предложен способ формирования скругленной кромки, позволяющей устранить острый переходный участок, являющийся местным концентратором напряжений. Операция скругления осуществляется путем локального удаления с кромки заусенцев анодным растворением. Эффективность процесса обеспечивается путем прижима перед анодным растворением заусенцев к стенкам канала и за счет этого созданием условий для управляемого формирования процесса скругления. Устройство для осуществления способа (рис. 2) имеет диэлектрический элемент с конической направляющей, который совершает возвратно-поступательные движения на длину рабочей части инструмента и пригибает заусенцы к стенкам отверстия.

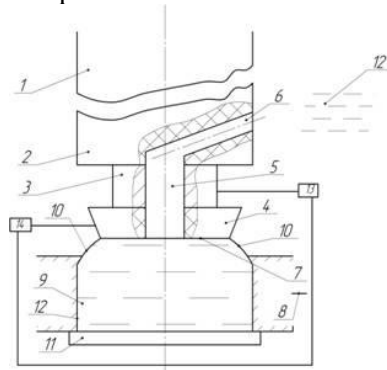


Рис. 2. Схема формирования скругления на кромках детали: 1 – электрод – инструмент (ЭИ); 2 – корпус ЭИ; 3 – рабочая часть ЭИ; 4 – направляющая с заборным конусом; 5, 9 – каналы для подачи электролита; 6 – обратный клапан на магистрали подачи электролита; 8 – деталь с рабочим торцом 7; 10 – заусенцы на кромке детали; 11 – заглушка для устранения утечек электролита; 12, 13 – привод для осуществления возвратно-поступательного движения ЭИ 1; 14 – датчик сопротивления движению ЭИ

Технологический процесс применения способа и устройства включает следующие этапы:

- подготовительный, на котором измеряют величину заусенцев и подбирают ЭИ с направляющей требуемого диаметра, назначают состав электролита и режимы обработки;

- работа на оборудовании; для чего канал 9 (рис. 2) заглушают со стороны, противоположной кромке с заусенцами 10, заглушкой 11. После этого устанавливают деталь 8 в электролит 12 так, чтобы его уровень был выше обратного клапана 6. Вводят направляющую 4 заборным конусом в канал 9, перемещают ее вдоль оси детали 8 так, чтобы торец 7 сминал заусенцы 10 и прижимал их к стенке отверстия детали. Величину перемещения ограничивают предельным

сопротивлением движению, оцениваемым датчиком 14, после чего изменяют направление движения от привода 13. Для анодного скругления кромки подается ток, а через канал 6 в канал 5 поступает электролит 12.

Рекомендуемые технологические режимы: напряжение 12 В, электролит – 15 % NaNO_3 , частота возвратно-поступательного движения ЭИ – 1 Гц, время обработки около 1 минуты для удаления заусенцев высотой до 0,3 мм и получения скругления кромки радиусом около 0,2 мм.

По патенту [4] получение закаленного слоя требуемой твердости обеспечивается тем, что одновременно с воздействием лазерного луча на закаливаемые участки подают охлаждающую среду, количество которой определяет глубину залегания измененного слоя, отвечающего эксплуатационным требованиям к режущему инструменту.

Для создания локального наклепанного слоя (табл. 2, раздел 3) может использоваться виброударная обработка. В последние годы появились новые методы импульсного воздействия, часть которых приведена в табл. 2.

По патенту [5] создан новый способ электроэрозионного упрочнения, выполняемого в жидкой среде охлажденных газов (например, азота, углекислоты), инструментами из титана, сплавов с высоким содержанием вольфрама и углерода. В процессе упрочнения под действием больших градиентов температур в микроуглублениях поверхностного слоя формируются участки высокой твердости из нитридов титана или карбидов, которые диффузионно связаны с металлом детали и прочно соединяют стенки микротрещин. При этом основной материал имеет меньшую твердость и служит «смазкой», например при работе упрочненного режущего инструмента, а отсутствие микротрещин устраняет возможность инфицирования инструмента в медицине (например, устройств для хирургических отделений лечебных заведений). Последнее дает возможность многократно использовать инструмент, имеющий высокую стоимость, который ранее утилизировался после разового применения. Способ по указанному патенту отличается тем, что в нем используется более доступная жидкая углекислота, имеющая температуру сжижения более высокую по сравнению с жидким азотом. Рабочая среда подается в виде аэрозоля под высоким давлением.

Для получения этим способом бездефектного слоя высокой твердости

рекомендуются режимы: емкость конденсаторов 0,1 – 0,5 мкФ, напряжение на электродах 80 – 100 В, давление жидкой углекислоты 0,7 – 0,8 МПа, ее расход 0,05 м³/мин, скорость перемещения инструмента 3 – 4 м/мин.

По патенту [6] для выравнивания скорости анодного растворения биметаллических материалов перед процессом снятия припусков с участков, имеющих пониженную скорость анодного растворения, их локально наклепывают, после чего некоторое время осуществляют общий съем, регулируя период обработки по наибольшей величине технологического тока. Если требуется обеспечить минимальную высоту неровностей, то процесс выполняют до снятия вершин микронеровностей, и за счет этого изменение геометрических размеров детали сохраняется в пределах допуска.

Способ поверхностного упрочнения по патенту [7] осуществляется за счет импульсов тока, подаваемых на металлические гранулы, помещенные в токопроводящую жидкость, и на средние секции секционных электродов. Упрочнение создается силовыми импульсами, формируемыми в зазоре между деталью и секциями. Схема обработки приведена на рис. 3.

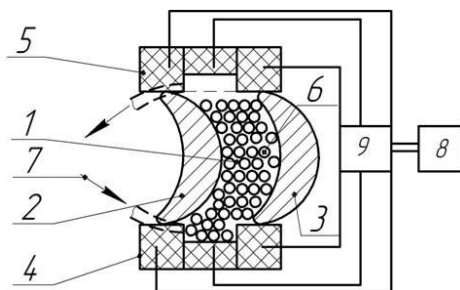


Рис. 3. Схема магнитно-импульсного упрочнения: 1 – межлопаточный канал между лопатками 2 и 3; 4, 5 – секционные электроды; 6 – гранулы; 7 – токопроводящая жидкость; 8 – генератор импульсов; 9 – переключатель полярности

Способ осуществляют в несколько этапов:

- очищают гранулы 6 от загрязнений (продукты обработки от предшествующей операции и др.). Операцию выполняют на используемом оборудовании при прокачке жидкости 7 с гранулами 6 через канал 1 между лопатками 2, 3. Процесс повторяют несколько раз за период обработки;

- подключают ток от генератора 8 на секции электродов 4, 5. Полярность тока изменяют переключателем 9 так, чтобы импульсные нагрузки на гранулы 6 были направлены против гравитационной силы, действующей на деталь, перемещаемую во время упрочнения в нескольких направлениях.

Это обеспечивает равномерность наклепа всех элементов детали;

- выполняют упрочнение до получения требуемого наклепа поверхностного слоя (для жаропрочных сплавов 3,5 – 3,6 %). Рекомендуются следующие режимы: напряжение в импульсе – 1кВ, длительность импульса 100 мкс, время обработки 5 – 10 мин.

В авторском свидетельстве предложен способ локального упрочнения, например, для повышения точности и интенсификации процесса маркирования профильным электродом. Обработку ведут с вибрацией инструмента, и в момент сближения электродов на расстояние 0,1 – 0,2 от наибольшего зазора одному из них придают импульсное ускорение 3 – 4G. При этом время пауз между импульсами берут равным длительности растворения металла под наносимым знаком с периодом, обеспечивающим заданную величину наклепа. Следует учитывать, что глубина цветного маркирования, для которого используется способ, не превышает 30 мкм. Поэтому такой наклеп практически не изменяет допустимых размеров геометрии детали.

На рис. 4 приведена схема упрочнения по авторскому свидетельству [8].

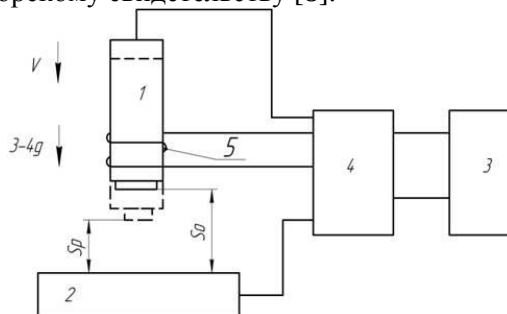


Рис. 4. Схема локального упрочнения под профилем инструмента для электрохимического маркирования: 1 – электрод – инструмент; 2 – деталь; 3 – источник тока; 4 – коммутатор; 5 – индуктор; S_p и S_0 – рабочий и начальный межэлектродный зазор; V – скорость электрода-инструмента в конце подачи импульса

В процессе локального упрочнения (рис. 4) электрод-инструмент 1 и обрабатываемая деталь 2 связаны с источником 3 технологического тока через коммутирующее устройство 4. В качестве исполнительного органа механизма импульсных ускорений служит индуктор 5 в форме соленоида с расположенным внутри него электродом – инструментом 1. Источник технологического тока в этом случае имеет два режима работы: первый для создания импульсных ускорений; второй (рабочий) – для осуществления процесса анодного растворения.

В первом периоде цикла осуществляется подача электрода – инструмента 1 к

обрабатываемой поверхности детали 2. Рабочее напряжение на электродах отсутствует. Далее зазор между электродами уменьшается. При достижении зазором величины $S_p = (0,1 \dots 0,2)S_0$ через коммутирующее устройство на обмотки соленоида подается напряжение первого режима работы источника технологического тока. Электрический ток, проходя по обмоткам катушки соленоида, создает внутри нее электромагнитное поле, которое, воздействуя на электрод-инструмент, выталкивает его, придавая импульсные ускорения $3 \dots 4G$.

Электрод – инструмент под действием импульсных ускорений при скорости V приходит в соприкосновение с обрабатываемой деталью, создавая местный наклеп. Напряжение на электроды и соленоид не подается.

В следующем периоде рабочего цикла электрод-инструмент отводится от обрабатываемой детали. В момент времени, когда наименьший зазор между электродами достигает требуемой рабочей величины S_p , в зону обработки подается электролит, а на электроды от источника тока импульс рабочего напряжения. Под действием технологического тока происходит процесс локального анодного растворения материала детали. Время протекания тока рассчитывают или выбирают равным времени растворения толщины слоя не более глубины наклепа.

Далее осуществляется остановка электрода – инструмента на расстоянии S_p от обрабатываемой детали. При этом напряжение на электродах отсутствует. Происходит интенсивная прокачка электролита через зазор. Величину зазора для промывки и обеспечения расхода электролита назначают в зависимости от свойств электролита и физико-механических свойств обрабатываемого материала. Повторение рабочих циклов производится до достижения заданной глубины маркирования.

Скорость анодного растворения существенно зависит от изменения степени наклепа обрабатываемой поверхности, причем для разных материалов она возрастает по линейной зависимости с возрастанием степени наклепа. По предлагаемому способу за счет местного поверхностного наклепа, создаваемого электродом-инструментом 1 под действием сообщенных ему импульсных ускорений, удается локализовать процесс анодного растворения и получить повышенное качество наносимой информации.

Для развития перспективных электрохимических и комбинированных

методов обработки требуется создание эффективных способов защиты от анодного растворения обработанных деталей, инструмента и другой технологической оснастки. При этом необходимо сохранить проводимость через них тока низкого напряжения (табл. 2, раздел 4) для подвода технологического тока в зону обработки.

По авторскому свидетельству [9] для защиты от анодного растворения прецизионных деталей предлагается формировать на них защитную зону с пассивирующей пленкой, получаемой на установке для формирования скругления на кромках (например по профилю зуба мелко модульных колес) в среде химически нейтрального порошкового наполнителя (типа формовочной смеси) при напряжении $3 - 4$ В в течение $1 - 2$ секунд. После этого выполняют скругление кромок при напряжении $12 - 18$ В в течение $2 - 6$ секунд (съем материала с кромки несколько микрон).

Для защиты от анодного растворения приспособлений предложен способ по авторскому свидетельству [10], позволяющий осуществлять через защищенную поверхность прохождение больших технологических токов, но не подвергать оснастку опасности разрушения. Наиболее эффективным этот способ оказался для создания защиты от растворения для титановых элементов конструкций. Достоинством способа является возможность осуществления химических преобразований в поверхностном слое непосредственно на станке путем режимных манипуляций. Для этого применяют сильно зашламленный электролит (загрязнение более $10 - 16\%$ по объему относительно жидкой фазы), составленный на базе хлористого натрия. При прямой полярности и низкой плотности технологического тока (регулируют напряжением, поддерживая плотность $0,1 - 0,5$ А/см²) проводят процесс пассивации (съем металла с детали при такой плотности тока отсутствует). Через несколько минут обработку прекращают, оснастку освобождают от электролита, высушивают, после чего процесс повторяют. После $3 - 5$ повторений поверхностный слой оснастки приобретает необходимые защитные свойства.

Аналогичный результат был получен для электродов-инструментов, выполненных (или покрытых слоем) из сплавов никеля по авторскому свидетельству [11], где на изготовленном инструменте формируют в зоне соприкосновения с электролитом окисную

пленку. Процесс выполняют путем нагрева на воздухе при температуре 1450 – 1490 К в течение 2 – 3 часов, после чего изделие охлаждают на воздухе. Изучение поверхности инструмента показало, что пленка на нем оплавилась и сформировалось надежное диэлектрическое покрытие, прочно связанное с материалом электрода. Исследование этого слоя показало, что он устойчиво переносит тепловые, ударные и химические воздействия, возникающие в процессе обработки. Для направленного подвода тока, требуемого для электрохимической размерной обработки, часть покрытия удаляется. При этом припуск не превышает 100 мкм, а границы покрытия не осыпаются при любой геометрии рабочей части инструмента. В результате практически исключается короткое замыкание (даже при высоких плотностях технологического тока), достигается лучшая локализация процесса обработки, повышается точность изготовления, снижаются затраты на изготовление и особенно на ремонт (в частности, при наблюдаемых ранее коротких замыканиях в случае нарушения технологической дисциплины).

В последние годы произошло сближение известных технологических приемов (например, виброударного метода, термической обработки) с процессами, протекающими под действием импульсных воздействий (электромагнитный, ультразвуковой способ) наложением электрического поля (электроэрозионная, электрохимическая размерная обработка) с лучевыми методами (лазер, плазма, электронно-лучевая обработка). Различные сочетания известных физических воздействий являются базой для разработки новых технологических процессов модификации поверхностного слоя (табл. 1, раздел 2 - 4).

Некоторые способы модификации (табл. 1) за счет изменения технологических режимов позволяют достичь нескольких назначений, отвечающих вопросам разработчиков новой техники. Так электроэрозионный процесс [22, 23, 27] может обеспечить создание новых видов металлических покрытий (табл. 1, раздел 3), обеспечить повышение эксплуатационных свойств без изменения геометрических размеров детали [15], удалить измененный слой [27]. Такие же возможности имеют лучевые методы (например, получение на изделиях поверхностных слоев с металлическими и диэлектрическими включениями) (табл. 1, раздел 4).

Заключение

Применение традиционных и вновь создаваемых способов модификации поверхностного слоя позволяет значительно расширить возможности разработчиков новой техники (особенно в авиакосмической отрасли) и создавать конкурентоспособную продукцию на уровне изобретений. Новые способы модификации открывают возможность полнее использовать полезные свойства материалов, применяемых в перспективных конструкциях изделий, и достигать уровня, близкого к теоретически возможным показателям современной техники.

Приведенные в работе результаты исследований способствуют эффективному развитию технологии машиностроения как на крупных машиностроительных предприятиях, так и в малом и среднем бизнесе промышленных отраслей.

Литература

1. Пат. 2269406 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ вибрационной обработки [Текст] / Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2004113683; заявл. 05.05.2004; опубл. 11.11.2006, Бюл. № 4. – 3 с.
2. Пат. 2241582 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ комбинированной зачистки изделий металлургического передела электродом – щеткой [Текст] / Смоленцев В.П., Кириллов О.Н., Смоленцев Е.В.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 200310323606; заявл. 03.02.2013; опубл. 11.11.2004, Бюл. № 34. – 3 с.
3. Пат. 2303087 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ и устройство для локальной электрохимической обработки кромок каналов [Текст] / Грицюк В.Г., Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2005115603; заявл. 23.05.2005; опубл. 11.11.2007, Бюл. № 20. – 3 с.
4. Пат. 2522818 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ лазерного упрочнения плоской заготовки [Текст] / Смоленцев В.П., Болдырев А.А., Болдырев А.И., Осеков А.Н.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 201123034; заявл. 07.06.2011; опубл. 11.11.2014, Бюл. № 35. – 3 с.
5. Пат. 2333823 Российская Федерация, МПК В23Н. Криволинейно-эрозионный способ упрочнения поверхностного слоя [Текст] / Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2006141994; заявл. 27.11.2006; опубл. 11.11.2008, Бюл. № 26. – 3 с.
6. Пат. 2277034 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ электрохимической обработки [Текст] / Грицюк В.Г., Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2004125209/02; заявл. 17.04.2004; опубл. 11.11.2006, Бюл. № 15. – 3 с.

7. Пат. 2333822 Российская Федерация, МПК В23Н. Способ комбинированной магнитно-импульсной обработки деталей лопаточных машин и устройство для его осуществления [Текст] / Смоленцев В.П. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 20061413223; заявл. 22.11.2006; опубл. 11.11.2008, Бюл. № 26. – 3 с.

8. А.с. 1192917 (SU), МПК В23Р. Способ размерной электрохимической обработки [Текст] / Смоленцев В.П., Болдырев А.И., Смоленцев Г.П.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 3702600; заявл. 20.02.1984; опубл. 11.11.1985, Бюл. № 43. – 3 с.

9. А.с. 1093456 (SU), МПК В23Р. Способ защиты необрабатываемых участков детали при электрохимической обработке [Текст] / Кешнер Р.Г. и др.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 3461724; заявл. 02.07.1982; опубл. 11.11.1984, Бюл. № 19. – 3 с.

10. А.с. 310772 (SU) МПК В23Р. Способ защиты токонесущих элементов из титановых сплавов при электрохимической обработке [Текст] / Шалишев В.М., Желтков З.И., Баширов Н.С., Смоленцев В.П., Мелентьев А.М.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 1385196; заявл. 08.12.1969; опубл. 11.11.1971, Бюл. № 24. – 3 с.

11. А.с. 529040 (SU) МПК В23Р. Способ изготовления электрода инструмента [Текст] / Смоленцев Г.П., Смоленцев В.П.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. - № 2074104; заявл. 11.11.1974; опубл. 11.11.1976, Бюл. № 35. – 3 с.

12. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии [Текст] / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. - Ростов н/Д.: ДГТУ, 2008. – 694 с.

13. Оптимизация технологических условий механической обработки деталей газотурбинных двигателей [Текст] / В.Ф. Безъязычный и др. - М.: МАИ, 1993. – 184 с.

14. Болдырев, А.И. Электрохимикомеханическая обработка [Текст] / А.И. Болдырев. - Воронеж: ВГТУ, 2012. – 243 с.

15. Бондарь, А.В. Качество и надежность [Текст] / А.И. Болдырев. - М.: Машиностроение, 2007. – 308 с.

16. Васильев, А.С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения [Текст] / А.С. Васильев и др. - М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.

17. Григорьев, С.Н. Нанесение покрытий и поверхностная модификация инструмента [Текст] / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова. - М.: Станкин, 2007. – 324 с.

18. Кадырметов, А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров [Текст] / А.М. Кадырметов. - Воронеж: Научная книга, 2013. – 260 с.

19. Кириллов, О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом [Текст] / О.Н. Кириллов. - Воронеж: ВГТУ, 2010. – 254 с.

20. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

21. Конструктивные особенности и технология изготовления ракетных двигателей нового поколения [Текст] // Сб. научн. трудов / под. ред. И.Т. Коптева и В.П. Смоленцева. - Воронеж: ВМЗ, 2014. – 190 с.

22. Машиностроение. Энциклопедия [Текст] / под. ред. А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение, 2000. – Т. III–3. - 840 с.

23. Научные технологии в машиностроении [Текст] / А.Г. Суслов, Б.М. Базров; под. ред. А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.

24. Смоленцев, В.П. Направление технологической модернизации наукоемких отраслей машиностроения [Текст] / В.П. Смоленцев, В.П. Мельников. - Воронеж: Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. - Т. 9, № 4. – С. 69-73.

25. Смоленцев, В.П. Ресурсосберегающие способы удаления толстослойных загрязнений и покрытий [Текст] / В.П. Смоленцев, А.В. Гребенников. - Металлообработка. - 2008. - № 5 – С. 32 – 35.

26. Справочник технолога – машиностроителя [Текст]: в 2 т. / под. ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова. - М.: Машиностроение, 2001. - Т. 2. – 944 с.

27. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки [Текст] / Е.В. Смоленцев. - М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.

28. Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях [Текст] / Г.А. Сухочев. - М.: Машиностроение, 2004. – 287 с.

29. Теоретические основы проектирования технологических комплексов [Текст] / под ред. А.М. Русецкого. - Минск: Беларус. навука, 2012. – 239 с.

Воронежский государственный технический университет
Московский государственный технологический университет

SURFACE LAYER MODIFICATION OF METAL PRODUCTS

S.V. Safonov, S.N. Grigoriev, V.P. Smolentsev

The article discusses the purpose and classification of conventional and newly invented methods of surface layer modification of metal products. It studies the feasibility of regulating the layer properties for improving the operational parameters of products, including strength, durability and marketability. It also highlights the opportunities of boosting the demand for coated products by improving the quality of items with a modified surface layer

Key words: modification, surface layer, product quality, regulation of surface layer properties

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ И РАЗМЕРНОСТЕЙ

Ю.А. Цеханов

С помощью теории подобия и размерностей выполнен анализ параметров резания и свойств материала заготовки, степень их влияния на процесс резания. Выбраны определяющие параметры и получены формулы мощности резания и ее составляющих от новых безразмерных параметров, которые позволяют проводить модельный эксперимент и рассчитывать энергосиловые параметры для других условий обработки

Ключевые слова: резание, модельный эксперимент, теория подобия и размерностей

Резание является основным промышленным формообразующим и чистовым методом механической обработки металлов. Поэтому разработке расчетных моделей его кинематических и энергосиловых параметров за последнюю сотню лет посвящено огромное число исследований. Их можно разделить на три группы, соответствующие хронологии их появления: инженерные эмпирические и полумпирические модели; модели, основанные на законах механики деформируемого твердого тела; численные компьютерные модели – метод конечных элементов. Модели первой группы не обладают универсальностью, т.к. каждая из них разрабатывалась для отдельных групп обрабатываемых материалов и для ограниченных диапазонов технологических режимов. В моделях второй математически сложно учитывать реологию обрабатываемого материала, зависящую от всей технологической истории его деформирования. Численные компьютерные модели позволяют учитывать довольно большой комплекс физико-механических явлений, но требуют большой трудоемкости для подготовки исходных данных и не позволяют эффективно выявлять общие закономерности механики резания. Инженерная наука накопила большой опыт изучения сложных явлений газо- и гидродинамики с помощью моделирования на основе теории подобия и размерностей. Современные достижения в областях самолето-, ракето- и судостроения в значительной степени обусловлены именно таким научным подходом. К сожалению, в механике деформируемого твердого тела и в теории резания, в частности, он не нашел пока достойного применения. В данной работе предлагается универсальный модельный подход, основанный на теории подобия и размерностей, для создания модельных экспериментов по изучению энергосиловых параметров процесса резания пластичных и хрупких материалов при лезвийной и абразивной обработке.

Пусть режущий инструмент (резец, абразивное зерно) движется со скоростью резания V_p в материале заготовки с номинальной глубиной резания h .

Резание пластичных материалов

Примем сначала, что материал заготовки пластичный и деформационно не упрочняется (рис. 1). Термическим разупрочнением (из-за разогрева при резании) в начале также пренебрежем. Скорость схода стружки - V_c .

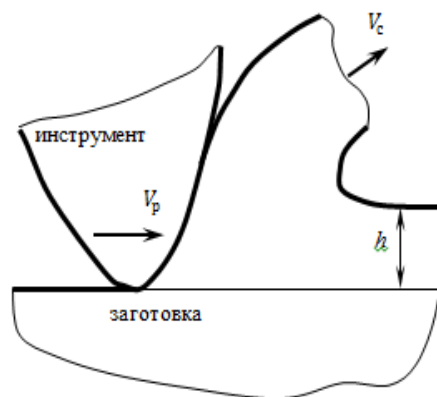


Рис. 1. Схема резания пластичного материала

Полная мощность W_p , расходуемая на резание, состоит из мощности пластических деформаций и трения заготовки об инструмент $W_{пл}$ и мощности кинетической энергии стружки W_k :

$$W_p = W_{пл} + W_k.$$

Другими энергетическими явлениями пренебрежем.

Определим параметры технологических режимов и свойств материала заготовки, влияющие на эти энергетические составляющие. Процесс резания пластичных материалов является достаточно устойчивым. Поэтому для него можно говорить о силе резания:

$$P_z = W_p / V_p. \quad (1)$$

Величина $W_{пл}$ зависит, очевидно, от h , V_p , σ_T - предела текучести материала заготовки, f - коэффициента трения об инструмент, а также от геометрических параметров инструмента (ГПИ). А мощность сил трения, входящая в $W_{пл}$, зависит также и от V_c , которая, в свою очередь, определяется V_p - величиной усадки стружки, на которую влияет f . Обобщая, запишем функциональную зависимость:

$$W_{пл} = W_{пл}(\sigma_T; V_p; h; f; \text{ГПИ}).$$

В соответствие с теорией размерностей [1] выбираем основные (определяющие) параметры: V_p (м/с), h (м), σ_t (н/м²; кг/м·с²). Но определяющими они являются не с точки зрения степени их влияния на процесс резания, а с точки зрения независимости их размерностей, т.к. размерность любого из них нельзя выразить через размерности двух других. Чтобы все остальные параметры стали безразмерными, выражаем их через эти три основные. Линейные геометрические параметры инструмента выражаем в новых единицах - h , а его угловые параметры и f уже являются безразмерными величинами.

Тогда в соответствии с [1]:

$$W_{пл} = \sigma_t^a h^b V_p^c \overline{W}_{пл}(1; 1; 1; f; \text{БГПИ}). \quad (2)$$

Через БГПИ обозначены «безразмерные ГПИ».

Чтобы размерности левой и правой частей выражения (2) были одинаковыми, выбираем показатели степеней: $a = 1, b = 2, c = 1$ (дж/с; н·м/с; кг·м²/с³):

$$W_{пл} = \sigma_t h^2 V_p \overline{W}_{пл}(f; \text{БГПИ}). \quad (3)$$

На основе этой формулы можно осуществить модельный эксперимент для определения зависимости безразмерной мощности $\overline{W}_{пл}$ от f и БГПИ.

В частном случае при ортогональном резании резцом с углом резания γ с шириной B и с длиной задней поверхности лезвия S :

$$W_{пл} = \sigma_t h^2 V_p \overline{W}_{пл}(f; \gamma, \overline{B}, \overline{S}), \\ \overline{B} = B/h; \overline{S} = S/h.$$

Мощность кинетической энергии стружки W_k зависит от ее скорости V_c , от массы стружки m , срезанной в единицу времени, а m зависит от V_p , h , плотности материала заготовки ρ и от ГПИ.

Тогда функциональная связь определяется как

$$W_k = W_k(V_p, h, \rho, f, \text{ГПИ}).$$

В качестве определяющих параметров выбираем V_p (м/с), h (м), ρ (кг/м³).

Тогда

$$W_k = V_p^d \rho^g h^e \overline{W}_k(1; 1; 1; f; \text{БГПИ}). \quad (4)$$

Уравнивая размерности обеих частей (4), получаем:

$$W_k = V_p^3 \rho h^2 \overline{W}_k(f, \text{БГПИ}).$$

Полная мощность резания:

$$W_p = V_p \sigma_t h^2 \overline{W}_{пл}(f; \text{БГПИ}) + \\ + V_p^3 \rho h^2 \overline{W}_k(f, \text{БГПИ}). \quad (5)$$

Преобразуем (5):

$$W_p = V_p \sigma_t h^2 \left[\overline{W}_{пл}(f; \text{БГПИ}) + \right. \\ \left. + 2 \frac{\rho V_p^2}{2\sigma_t} \overline{W}_k(f, \text{БГПИ}) \right]. \quad (6)$$

Комбинацию

$$D = \frac{\rho V_p^2}{2\sigma_t} \quad (7)$$

назовем **динамическим параметром резания**.

Величина

$$\sigma_d = \frac{\rho V_p^2}{2} \quad (8)$$

является инерционным динамическим давлением стружки на единицу площади основания срезаемого слоя, а параметр $D = \sigma_d / \sigma_t$ определяет соотношение между динамическими и квазистатическими (при медленном резании) давлениями и соответствующими составляющими полной силы резания. Тогда

$$W_p = V_p \sigma_t h^2 \left[\overline{W}_{пл}(f, \text{БГПИ}) + 2D \overline{W}_k(f, \text{БГПИ}) \right], \quad (9)$$

или

$$W_p = V_p \sigma_t h^2 \overline{W}_p(D, f, \text{БГПИ}), \quad (10)$$

$$\overline{W}_p(f, \text{БГПИ}) = \overline{W}_{пл}(f, \text{БГПИ}) + 2D \overline{W}_k(f, \text{БГПИ}). \quad (11)$$

Безразмерная полная мощность $\overline{W}_p$ зависит от безразмерных параметров D , f и БГПИ.

Если геометрия инструмента и условия трения неизменны, то $W_p = V_p \sigma_t h^2 \overline{W}_p(D)$.

Как видно из (9), величина $\overline{W}_p$ от D зависит линейно (рис. 2). И моделирующий эксперимент осуществляется варьированием критерия подобия D для определения зависимости (11).

При иных (чем модельные) условиях резания мощность рассчитывается по формуле (10) с использованием значений $\overline{W}_p$, полученных при моделировании.

Сила резания с учетом (2)

$$P_z = \sigma_t h^2 \overline{W}_p(D, f, \text{БГПИ}). \quad (12)$$

Если обрабатывается материал, который деформационно упрочняется, то за параметр, характеризующий его сопротивляемость резанию, вместо σ_t удобно выбрать твердость H (НВ, НВ). Это экспериментально хорошо подтверждается для такого процесса с большой степенью деформации, как дорнование (деформирующее протягивание) толсто-стенных заготовок [2]. В этом случае (10) и (12) принимают вид:

$$W_p = V_p H h^2 \overline{W}_p(D, f, \text{БГПИ}), \quad (13)$$

$$P_z = H h^2 \overline{W}_p(D, f, \text{БГПИ}). \quad (14)$$

Преобразуем (14):

$$W_p = V_p \sigma_t h^2 \overline{W}_{пл}(f, \text{БГПИ}) \left(1 + 2D \frac{\overline{W}_k}{\overline{W}_{пл}} \right), \quad (15)$$

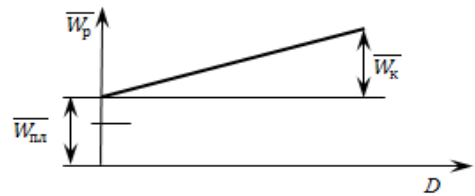


Рис. 2. Зависимость безразмерной мощности W_p от параметра D

а с учетом (10):

$$\overline{W}_p = K_d \overline{W}_{пл}(f, \text{БГПИ}), \quad (16)$$

$$P_z = K_d H h^2 \overline{W}_{пл}(f, \text{БГПИ}). \quad (17)$$

Величину

$$K_d = 1 + 2D \frac{\overline{W}_k}{\overline{W}_{пл}} \quad (18)$$

назовем **динамическим коэффициентом**, т.к. он показывает, во сколько раз при скоростном резании за счет инерционности стружки возрастают мощность и сила резания по сравнению с этими величинами при квазистатической (очень медленной) обработке.

В работе [3] для модели ортогонального резания с одной плоскостью разрыва скоростей (плоскостью сдвига) получено теоретическое решение задачи определения P_z . По структуре оно соответствует зависимостям (6 - 18). В частности, получена формула:

$$K_d = 1 + D \frac{4 \cos \gamma \sin \beta}{\cos(\beta - \gamma)}; \quad (19)$$

η – угол трения: $\tan \eta = f$, β – угол наклона плоскости сдвига, который находится из решения уравнения

$$\frac{\cos(2\beta + \eta - \gamma) \cos^2(\beta - \gamma)}{\sin(2\beta - 2\gamma + \eta) \sin^2 \beta \cos \gamma} = -4D.$$

Изменение прочностных свойств материала заготовки из-за его нагрева при резании можно учесть следующим образом. Превращение мощности пластических деформаций $\overline{W}_{пл}$ в тепловую энергию Q можно считать адиабатическим процессом. Пусть известна зависимость σ_T от температуры θ : $\sigma_T = \varphi(\theta)$. Из структуры формулы (3) следует, что $\overline{W}_{пл}$ не зависит от σ_T , следовательно, она не зависит и от термического разупрочнения. Тогда $\overline{W}_{пл} = Q$. Тепловая энергия в стружке с массой m , срезаемой в единицу времени, $Q = C m (\theta - \theta_0)$, где $m = A V_p \rho$, A – площадь поперечного сечения канавки от инструмента; C – удельная теплоемкость материала заготовки, θ_0 – его начальная температура.

Из (3) и приведенных выше формул получаем:

$$\overline{W}_{пл} = \varphi \left(\theta_0 + \frac{\overline{W}_{пл}}{C A V_p \rho} \right) h^2 V_p \overline{W}_{пл}(f; \text{БГПИ}),$$

$$P_z = \varphi \left(\theta_0 + \frac{P_z}{C A \rho} \right) h^2 \overline{W}_{пл}(f; \text{БГПИ}).$$

Эти трансцендентные уравнения можно решить относительно P_z и $\overline{W}_{пл}$.

Резание хрупких материалов

Экспериментально установлено [4], что размеры отдельных каверн, образующихся при резании хрупких материалов, гораздо больше поперечных размеров инструмента, а его взаимодействие с заготовкой осуществляется только вершиной и носит дискретно-импульсный и стохастический характер (рис. 3). Это позволяет учитывать не форму инструмента, а лишь номинальную глубину его внедрения h .

При резании хрупкого материала (особенно с большой скоростью) осколки (шлам) разлетаются с большими скоростями – 200 м/с и более, что, скорее, похоже на череду микровзрывов, а не на установившийся процесс. И говорить о силе резания

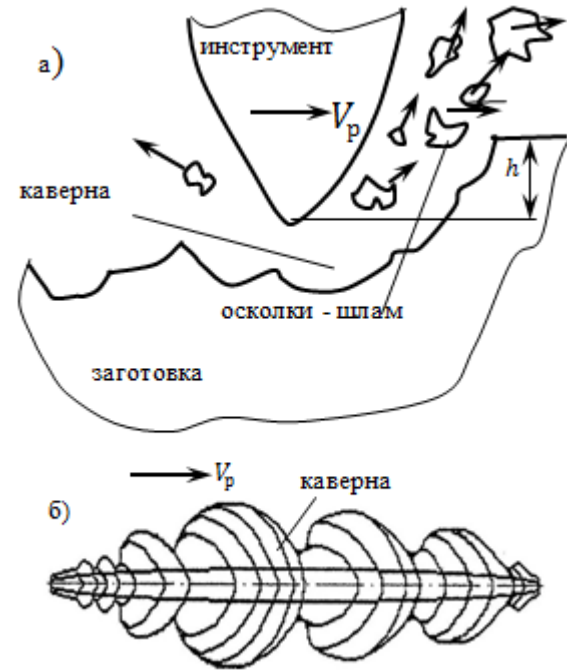


Рис. 3. Резание хрупкого материала: а) схема резания, б) след микрорезания на поверхности хрупкого материала абразивным зерном /4/

единичным инструментом (или о силе микрорезания абразивным зерном) нельзя. Поэтому для изучения энергетики процесса будем учитывать только мощность энергии, которая расходуется как на образование свободной поверхности при трещинообразовании $\overline{W}_n$, так и на кинетическую энергию осколков $\overline{W}_k$. Другие энергетические явления рассматривать не будем.

Мощность $\overline{W}_n$ (с учетом стохастического характера параметров резания) зависит от N_1 – числа осколков, образующихся в единицу времени; S_1 – площади поверхности одного осколка; γ_n – удельной энергии трещинообразования, затрачиваемой на образование единичной свободной поверхности трещин. В свою очередь, N_1 зависит от V_p – скорости резания и h – глубины резания; U – удельной потенциальной энергии упругих деформаций материала заготовки и от его сопротивляемости хрупкому разрушению, определяемой γ_n . Площадь S_1 зависит от характерного размера осколка l_1 . На размер осколка l_1 влияют V_p , h , U , γ_n . Упругая энергия U зависит также и от упругих свойств материала заготовки, прежде всего от модуля упругости E .

Обобщая, описанное взаимовлияние параметров резания, определим функциональную связь:

$$\overline{W}_n = \overline{W}_n(V_p, h, E, \gamma_n).$$

Величина $\overline{W}_k$ зависит от N_1 ; m_1 – массы одного осколка; V_1 – его скорости. В свою очередь, m_1 зависит от l_1 , ρ – плотности материала заготовки, а V_1 зависит от V_p , ρ , U .

Обобщая, получаем функциональную связь:

$$\overline{W}_k = \overline{W}_k(\rho, h, V_p, E).$$

Полная мощность

$$W_p = W_n(V_p, h, E, \gamma_n) + W_k(\rho, h, V_p, E).$$

Для W_n в качестве определяющих параметров выбираем: V_p (м/с); h (м); E (н/м²; кг/мс²). Как видно, их размерности независимы друг от друга, а вот размерность γ_n - дж/м²; кг/с² можно выразить через их размерности, составив безразмерную комбинацию:

$$TS_n = \frac{\gamma_n}{Eh}, \quad (20)$$

которая является безразмерным критерием подобия механики резания хрупкого материала постановки модельного эксперимента.

Тогда $W_n = V_p^b E^c h^a \overline{W}_n(1; 1; 1; TS_n)$.

Уравнивая размерности левой и правой частей

($a = 2$; $b = 1$; $c = 1$), получаем:

$$W_n = V_p E h^2 \overline{W}_n(TS_n). \quad (21)$$

Выполнив аналогичный анализ и приняв в качестве определяющих параметров ρ , V_p и h , получим выражение для W_k :

$$W_k = V_p^3 \rho h^2 \overline{W}_k(TS_k), \quad (22)$$

а величина E выражается через эти параметры с помощью безразмерной комбинации:

$$TS_k = \frac{\rho V_p^2}{E}, \quad (23)$$

которая является вторым безразмерным критерием подобия процесса резания хрупкого материала.

Полная мощность резания

$$W_p = V_p E h^2 \overline{W}_n(TS_n) + V_p^3 \rho h^2 \overline{W}_k(TS_k). \quad (24)$$

Преобразуем эту зависимость:

$$W_p = V_p^3 \rho h^2 \left[\frac{1}{TS_k} \overline{W}_n(TS_n) + \overline{W}_k(TS_k) \right]; \quad (25)$$

$$W_p = V_p^3 \rho h^2 \overline{W}_p(TS_n; TS_k); \quad (26)$$

$$\overline{W}_p = \overline{W}_p \left[\frac{1}{TS_k} \overline{W}_n(TS_n) + \overline{W}_k(TS_k) \right]. \quad (27)$$

Или

$$\overline{W}_p = \overline{W}_p(TS_n; TS_k). \quad (28)$$

На основе формул (20 - 28) можно спланировать и выполнить модельный эксперимент для определения зависимостей безразмерных мощностей $\overline{W}_n$, $\overline{W}_k$ и $\overline{W}_p$ от безразмерных критериев подобия TS_n и TS_k . Результаты такого моделирования могут быть использованы для расчета мощности резания любого хрупкого материала при произвольных параметрах путем пересчета по формуле (28).

При экспериментальном изучении трещиностойкости хрупких материалов широко используется K_{Io} - коэффициент концентрации напряжений, который связан с удельной энергией трещинообразования γ зависимостью

$$\gamma = K_{Io}^2 \frac{1 - \mu^2}{2E};$$

μ - коэффициент Пуассона.

С учетом этой связи

$$TS_n = \frac{K_{Io}^2 (1 - \mu^2)}{E^2 h}.$$

Из теории упругости известно, что величина μ незначительно влияет на величину энергии упругих деформаций, поэтому ей можно пренебречь, а критерий подобия TS_n представить в более удобном виде:

$$TS_n = \frac{K_{Io}}{E \sqrt{h}}.$$

Таким образом, на основе методов теории подобия и размерностей получены аналитические зависимости, позволяющие спланировать и провести эксперимент по моделированию процесса резания как пластичных, так и хрупких материалов для получения универсальных зависимостей безразмерных мощностей и сил резания от предложенных критериев подобия процесса. Эти зависимости в дальнейшем можно использовать для расчета энергетических и силовых параметров резания любых материалов.

Изложенный в данной работе подход и полученные зависимости между безразмерными и размерными параметрами полезны и для более глубокого изучения механики резания на основе фундаментальных физических законов.

Литература

1. Седов, Л.И. Методы подобия и размерности в механике [Текст] / Л.И. Седов. - М.: Наука, 1972. - 440 с.
2. Цеханов, Ю.А. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании [Текст] / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин. - Воронеж: Изд-во ВГТА, 2001. - 200 с.
3. Цеханов, Ю.А. Модель скоростного ортогонального резания [Текст] / Ю.А. Цеханов // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. - Вып. 75. - С. 434.
4. Старов, В.Н. Основы механики микрорезания материалов [Текст] / В.Н. Старов, Ю.А. Цеханов, М.Ю. Еремин. - Воронеж: Изд-во ВГТА, 2006. - 102 с.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

MODELING THE MECHANICS OF CUTTING ON THE BASIS OF THE THEORY OF SIMILARITY AND DIMENSIONS

Y.A. Tsekhanov

On the basis of the theory of similarity and dimensions the analysis of cutting process of ductile and brittle materials is made. The influence of cutting parameters and properties of the workpiece material on the cutting process is analyzed. The parameters and formulas to define the cutting power and its components from the new dimensionless parameters are selected. They allow to model experiment and to calculate the energy-power parameters for other conditions

Key words: cutting, model experiment, theory of similarity and dimensions

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ДВИЖЕНИЯ С ВОЗМУЩАЮЩИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

Е.М. Васильев, Н.О. Мельник

В статье рассматривается задача построения математической модели беспилотного летательного аппарата с учётом реальных аэродинамических эффектов, возникающих при его движении в открытом пространстве и затрудняющих стабилизацию аппарата как объекта управления. Получены соотношения, определяющие векторы сил и вращающих моментов, появляющихся вследствие этих эффектов, и с их учётом построена полная модель движения аппарата

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, динамическая модель, возмущающие воздействия

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) относятся к структурно неустойчивым объектам, работа которых в условиях с возмущающими воздействиями представляет собою, в широком понимании, критический режим их функционирования [1-3]. Для проектирования систем управления, обеспечивающих длительное автоматическое поддержание таких режимов, необходимы соответствующие динамические модели БПЛА, адекватно описывающие поведение аппарата в реальных условиях его движения [4-6]. К наиболее существенным из этих условий относятся турбулентные воздушные потоки и соответствующие опрокидывающие моменты, затрудняющие стабилизацию аппарата при его перемещении в открытом воздушном пространстве.

В работе рассматривается БПЛА вертолётного типа с четырьмя несущими винтами, схема которого представлена на рис. 1.

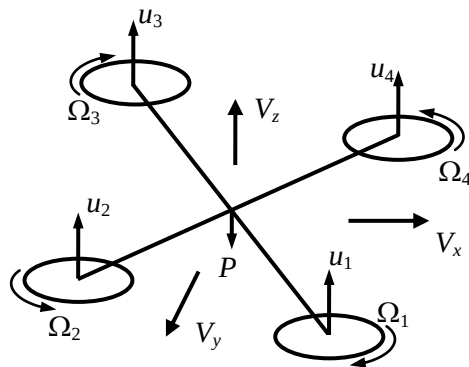


Рис. 1. Компоновочная схема БПЛА

На рис. 1 обозначены: $\Omega_1, \dots, \Omega_4$ – частоты вращения винтов с указанием направлений вращения; $u_1, \dots, u_4$ – силы тяги каждого винта; P – сила тяжести несущей платформы; V_x, V_y, V_z – векторы скоростей в собственной – подвижной системе координат платформы.

Кинематические соотношения всех физических величин, описывающих движение аппарата в неподвижной XYZ и подвижной хуу системах координат (рис. 2), задаются уравнениями:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

с помощью ортогонального преобразования C :

$$C = \begin{bmatrix} c\theta \cdot c\psi & c\theta \cdot s\psi & -s\theta \\ s\phi \cdot s\theta \cdot c\psi - c\phi \cdot s\psi & s\phi \cdot s\theta \cdot s\psi + c\phi \cdot c\psi & s\phi \cdot c\theta \\ c\phi \cdot s\theta \cdot c\psi + s\phi \cdot s\psi & c\phi \cdot s\theta \cdot s\psi - s\phi \cdot c\psi & c\phi \cdot c\theta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где символами c и s обозначены тригонометрические функции $\cos(\cdot)$ и $\sin(\cdot)$, аргументами которых являются угловые координаты платформы аппарата: ϕ – крен, θ – тангаж, ψ – курс (рис. 2).

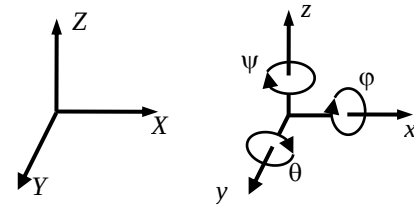


Рис. 2. Неподвижная XYZ и подвижная хуу системы координат аппарата

Матричное уравнение движения БПЛА в декартовых координатах XYZ представим в виде

$$m\dot{V} = u + D - P - F - H, \quad (3)$$

в котором m – масса аппарата; V – вектор скорости центра масс.

Сформируем компоненты уравнения (3).

u – вектор силы тяги винтов:

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_z \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$u_z = k_u R^2 \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 = u_1 + u_2 + u_3 + u_4,$$

где k_u – коэффициент тяги винта; R – радиус винта.

D – вектор дополнительной силы тяги, возникающей при обтекании платформы воздухом в плоскости винтов:

$$D = \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D_z \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$D_z = 4k_u (V_{отн,x}^2 + V_{отн,y}^2).$$

$V_{отн,(x,y)}$ – компоненты скорости центра масс платформы относительно воздуха в подвижной системе координат хуz:

$$\begin{bmatrix} V_{отн,x} \\ V_{отн,y} \\ V_{отн,z} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} V_{отн,X} \\ V_{отн,Y} \\ V_{отн,Z} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} V_X - V_{B,X} \\ V_Y - V_{B,Y} \\ V_Z - V_{B,Z} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $V_{отн,(X,Y,Z)}$ – компоненты скорости центра масс БПЛА относительно воздуха в координатах XYZ; $V_{(X,Y,Z)}$ – компоненты скорости центра масс в неподвижной системе координат XYZ; $V_{B,(X,Y,Z)}$ – компоненты скорости ветра в координатах XYZ.

P – вектор силы тяжести:

$$P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_Z \end{bmatrix}; \quad P_Z = mg, \quad (7)$$

g – ускорение свободного падения.

F – вектор сил сопротивления воздуха перемещению корпуса БПЛА:

$$F = \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{F,X} \cdot V_{отн,X} \cdot |V_{отн,X}| \\ k_{F,Y} \cdot V_{отн,Y} \cdot |V_{отн,Y}| \\ k_{F,Z} \cdot V_{отн,Z} \cdot |V_{отн,Z}| \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $k_{F,(X,Y,Z)}$ – коэффициенты сопротивления воздуха перемещению корпуса; для рассматриваемого аппарата принимаем $k_{F,X} = k_{F,Y}$.

H – сила сопротивления воздуха вращению винтов определяется в соответствии с рис. 3:

$$H = k_H [(\Omega R + V)^2 - (\Omega R - V)^2] = 4k_H \Omega R V,$$

или

$$H = \begin{bmatrix} H_X \\ H_Y \\ H_Z \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} V_{отн,x} \\ V_{отн,y} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 4k_H R \sum_{i=1}^4 \Omega_i, \quad (9)$$

k_H – коэффициент сопротивления воздуха вращению винтов.

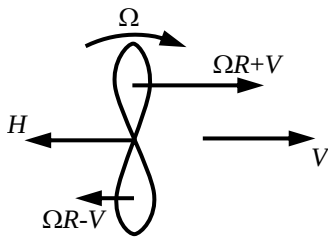


Рис. 3. Схематическое изображение действия силы сопротивления воздуха вращению винта

После подстановки (5)-(9) в (3) получаем уравнение движения центра масс БПЛА в неподвижной системе координат:

$$m \begin{bmatrix} \dot{V}_X \\ \dot{V}_Y \\ \dot{V}_Z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} -H_x \\ -H_y \\ u_z + D_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Уравнение движения для угловых перемещений платформы:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \bar{\omega} \times J \bar{\omega} = Q + G + B, \quad (11)$$

в котором J – матрица главных моментов инерции БПЛА относительно осей x,y,z платформы:

$$J = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix},$$

ω – вектор угловых скоростей вращения платформы относительно осей x,y,z:

$$\omega = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_\phi \\ \omega_\theta \\ \omega_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix};$$

$J \frac{d\omega}{dt} + \bar{\omega} \times J \bar{\omega}$ – изменение момента количества движения платформы:

$$J \frac{d\omega}{dt} + \bar{\omega} \times J \bar{\omega} = \begin{bmatrix} J_x \dot{\omega}_x \\ J_y \dot{\omega}_y \\ J_z \dot{\omega}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i & j & k \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ J_x \omega_x & J_y \omega_y & J_z \omega_z \end{bmatrix},$$

откуда

$$\begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} + \bar{\omega} \times J \bar{\omega} &= \\ &= \begin{bmatrix} J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_x \omega_z \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_y \omega_x \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} J_x \dot{\omega}_\phi + (J_z - J_y) \omega_\theta \omega_\psi \\ J_y \dot{\omega}_\theta + (J_x - J_z) \omega_\phi \omega_\psi \\ J_z \dot{\omega}_\psi + (J_y - J_x) \omega_\theta \omega_\phi \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

В силу X-компоновки платформы (рис. 1) $J_y = J_x$.

Определим моменты сил в уравнении (11).

Q – вращающие моменты относительно осей x,y,z, обусловленные несовпадением частот вращения $\Omega_1, \dots, \Omega_4$ винтов и соответственно сил тяги $u_1, \dots, u_4$:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u R^2 \cdot \ell \cos(45^\circ) (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \\ k_u R^2 \cdot \ell \cos(45^\circ) (-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \\ k_H R^3 \cdot (-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

ℓ – расстояние от центра масс платформы до оси каждого винта (длина несущей балки). Выражение для компоненты Q_z получено из рис. 4.

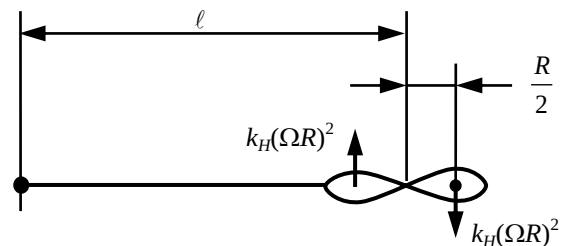


Рис. 4. Схема возникновения момента Q_z

Из геометрических соотношений, показанных на рис. 4, следует:

$$\begin{aligned} Q_{z(1,\dots,4)} &= k_H (\Omega R)^2 \left(\ell + \frac{R}{2} \right) - k_H (\Omega R)^2 \left(\ell - \frac{R}{2} \right) = \\ &= k_H (\Omega R)^2 \cdot R = k_H R^3 \Omega^2. \end{aligned} \quad (14)$$

G – вектор гироскопических и реактивного моментов, возникающих относительно осей x, y и z соответственно:

$$G = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{\text{ИМ}}(-\dot{\Omega}_1 + \dot{\Omega}_2 - \dot{\Omega}_3 + \dot{\Omega}_4) \cdot \omega_\theta \\ J_{\text{ИМ}}(\dot{\Omega}_1 - \dot{\Omega}_2 + \dot{\Omega}_3 - \dot{\Omega}_4) \cdot \omega_\phi \\ J_{\text{ИМ}}(-\dot{\Omega}_1 + \dot{\Omega}_2 - \dot{\Omega}_3 + \dot{\Omega}_4) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

в котором $J_{\text{ИМ}}$ – момент инерции вращающихся частей исполнительного механизма, приведенный к оси двигателя.

B – опрокидывающий момент, возникающий из-за несовпадения точки приложения силы сопротивления воздуха поступательному перемещению платформы и её центра масс (рис. 5):

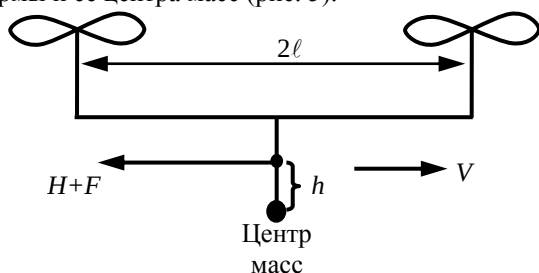


Рис. 5. Схема возникновения опрокидывающего момента B

$$B = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (H_y + F_y) \cdot h \\ -(H_x + F_x) \cdot h \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где компоненты вектора F в осях x, y определяются из соотношения

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \end{bmatrix}.$$

Результирующее уравнение движения БПЛА в угловых координатах принимает вид:

$$J \begin{bmatrix} \dot{\omega}_\phi \\ \dot{\omega}_\theta \\ \dot{\omega}_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_\psi & -\omega_\theta \\ -\omega_\psi & 0 & \omega_\phi \\ \omega_\theta & -\omega_\phi & 0 \end{bmatrix} \cdot J \cdot \begin{bmatrix} \omega_\phi \\ \omega_\theta \\ \omega_\psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Воронежский государственный технический университет

MATHEMATICAL MODEL OF UNMANNED AERIAL VEHICLE IN CONDITIONS OF MOVEMENT WITH DISTURBING INFLUENCES

E.M. Vasiljev, N.O. Melnic

The article deals with the problem of constructing a mathematical model of an unmanned aerial vehicle, taking into account the actual aerodynamic effects associated with its motion in open space and impede the stabilization device as a control object. The relations defining vectors of forces and torques arising from these effects and their consideration to construct a complete model of the motion of the machine

Key words: unmanned aerial vehicle, dynamic model, disturbing influences

Таким образом, в полном виде уравнения (10) и (17) описывают движение центра масс и вращение платформы вокруг собственных осей рассматриваемого типа БПЛА с учётом аэродинамических эффектов, порождающих:

вектор дополнительной силы тяги, возникающей при обтекании платформы воздухом в плоскости винтов;

вектор сил сопротивления воздуха перемещению корпуса БПЛА;

вектор сил сопротивления воздуха вращению винтов;

вектор опрокидывающего момента, возникающего из-за несовпадения точки приложения силы сопротивления воздуха поступательному перемещению платформы и её центра масс.

Учёт указанных эффектов позволяет повысить адекватность модели и качество проектирования соответствующих систем управления БПЛА.

Литература

- Змеу, К.В. Моделирование динамики сложного механического объекта [Текст] / К.В. Змеу, М.Н. Невмержицкий, Б.С. Ноткин // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2013. – № 4(17). – С. 82-89.
- Peña, M. Identification of an Unstable Nonlinear System: Quadrotor [Text] / M. Peña, A. Luna, C. Rodríguez // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering. – 2014. – Vol. 8, №. 2. – P. 307-315.
- Rodic, A. Modeling and simulation of quad-rotor dynamics and spatial navigation [Text] / A. Rodic, G. Mester // Intelligent Systems and Informatics (SISY 2011): IEEE 9th International Symposium. – Subotica, 2011. – P. 23-28.
- Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощённой математической модели [Текст] / А.А. Пыркин, Т.А. Мальцева, Д.В. Лабадин и др. // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 4. – С. 47-51.
- Ситников, Д.В. Система управления движением мультикоптера [Текст] / Д.В. Ситников, В.А. Бурьян, Г.С. Русских // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 5. – С. 33-37.
- Simple GUI Wireless Controller of Quadcopter [Text] / D. Hanafi, M. Qetkeaw, R. Ghazali et al. // International Journal of Communications, Network and System Sciences. – 2013. – Vol. 6, № 1. – P. 52-59.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ SQL-ЗАПРОСА В СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕПЛИКАЦИИ И СЕКЦИОНИРОВАНИЯ ОТНОШЕНИЯ

М.В. Локшин, С.А. Рыков

В статье рассматривается подход к параллельному исполнению SQL-запроса в системах с MPP архитектурой с использованием избыточного представления данных и секционирования одного отношения. Показывается применимость данного подхода к широкому классу запросов

Ключевые слова: СУБД, репликация, секционирование

При работе с большими базами данных для достижения приемлемого времени обработки аналитических запросов применяются различные методы их параллельной обработки. В настоящее время считается, что наиболее перспективные решения строятся на основе массово-параллельной архитектуры обработки данных из-за значительных возможностей по масштабированию таких систем.

Подход к использованию репликации отношений в системах с массово-параллельной обработкой подробно описан в [1, 2]. Такое решение позволяет эффективно обрабатывать большой спектр аналитических запросов к большим отношениям. В работе [2] приводится анализ исполнения запросов теста TPC-H с использованием предложенного механизма параллельной обработки SQL-запросов. Показана пригодность данного подхода для всех запросов теста, причем ускорение, получаемое в результате применения данного метода параллельного исполнения запросов, близко к линейному. Интересно отметить, что в некоторых случаях наблюдается ускорение больше, чем линейное. Данное поведение можно объяснить тем, что с уменьшением объема обрабатываемого отношения (в расчете на один узел) СУБД может ограничиться использованием оперативной памяти для проведения операций соединения, сортировки и т.д.

При репликации достигается увеличение надежности хранения данных, а за счет использования RAID-0 массивов появляется возможность увеличить быстродействие узла системы [3]. Отрицательным моментом предложенной схемы является полное дублирование отношений на всех узлах системы, хотя именно это позволяет эффективно распараллеливать исполнение запросов в системе.

Решением проблемы с использованием избыточного объема дисковой памяти может являться хорошо известная схема секционирования отношений. Однако в этом случае возникает проблема передачи значительных объемов данных между узлами системы при исполнении SQL-запросов, что может крайне отрицательно влиять на общую скорость работы. Такая проблема характерна, например, при вычислении оператора JOIN.

Возможна комбинация предложенных решений для параллельной обработки SQL-запросов, которая будет сочетать достоинства обоих вариантов. Необходимо использовать для секционирования одно и только одно из отношений схемы базы данных. Если при этом остальные отношения реплицируются между узлами системы, то возможно использовать описанную в [1,2] схему параллельного исполнения запроса с незначительными изменениями. Для секционирования логично выбирать наибольшую по размеру таблицу. При этом можно получить существенный выигрыш по объему дисковой памяти, если секционируемое отношение содержит большую часть данных схемы. Классическим примером подобной схемы является схема «звезда», по которой строятся хранилища данных, содержащие таблицу фактов и множество таблиц измерений. Заметим, что именно эта схема используется в тестах TPC-H и TPC-D.

Большинство SQL-запросов допускают эффективное распараллеливание в такой комбинированной архитектуре.

Пусть N – количество узлов в системе. Считаем, что одно из отношений схемы секционировано на N частей по узлам системы. Остальные отношения схемы полностью реплицированы по всем узлам системы.

В данной архитектуре возможно использование RAID-0 массивов. Подробное исследование данной схемы проведено в [3]. Репликация обеспечивает необходимый уровень избыточности для всех отношений схемы, кроме сег-

Локшин Марк Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 43-77-18

Рыков Сергей Александрович – ВГТУ, канд. техн. наук, ст. преподаватель, тел. (473) 43-77-18

ментированной таблицы. Очевидно, что для повышения уровня отказоустойчивости секционированное отношение также должно быть реплицировано. При этом, если число сегментов отношения равно n , а число повторений сегментов равно m , то для обеспечения одинаковой отказоустойчивости всех сегментов должно выполняться равенство $n \cdot m = N$.

Если не удастся добиться кратности N и m из-за ограничения количества доступных серверов, то возможно применение следующей схемы разделения данных. Выбирается число $k > n$ с таким расчетом, чтобы выполнялось равенство $k \bmod N = 0$. Далее отношение фрагментируется на k частей по N серверам по следующей схеме.

На i -й узел системы помещаем фрагменты с номерами из диапазона от $(\frac{k}{N} \cdot (i + j - 2)) \bmod k + 1$ до $(\frac{k}{N} \cdot (i + j - 1)) \bmod k$, где j принимает значения от 1 до m . Если при вычислении верхней границы диапазона получается 0-й фрагмент, то мы его считаем равным фрагменту m .

Если число k выбирать достаточно малым, то можно осуществлять динамическую балансировку данных при добавлении новых узлов в систему.

Рассмотрим запрос с условием фильтрации по атрибуту отношения.

```
SELECT *
FROM R
WHERE C.
```

В случае, если отношение R является реплицированным, то в схеме исполнения запроса, описанной в [2], не происходит никаких изменений. Если отношение R является секционированным, то возможны следующие схемы исполнения запроса:

1. Если осуществляется сканирование всего отношения R , то в качестве точек разбиения фрагментов отношения целесообразно брать границы сегментов секционированного отношения. Если отношение реплицировано на другие узлы системы, то сегменты могут быть разделены дополнительными точками разбиения, равными числу реплицированных копий сегментированного отношения.

2. Если условие C накладывает ограничения на атрибут разбиения таким образом, что осуществляется сканирование только части отношения R , то возможна ситуация, в которой все данные, необходимые для запроса, будут находиться на одном (возможно нескольких) узлах системы. В таком случае имеет смысл

разбивать сегментированное отношение на интервалы, количество которых равно числу реплицированных копий сегментированного отношения. Однако при таком разбиении мы можем использовать для параллельного исполнения SQL-запроса лишь часть узлов системы – тех, на которых находятся копии секции отношения.

Для решения проблемы перекоса в данных между узлами системы, возникающей при трансформации SQL-запроса, возможно воспользоваться схемой секционирования данных, предложенной выше (для случая, когда количество реплицируемых серверов не кратно количеству узлов системы). При этом величину k нужно выбирать достаточно большой, чтобы обеспечивать перемешивание секций между узлами системы. Функция, которая определяет сервер, на какой должен быть помещен фрагмент отношения, имеет вид $k \bmod N$. Такое распределение обеспечивает возможность параллельного исполнения SQL-запросов с учетом ограничений условия C . Если условие C в данном случае однозначно определяет фрагмент, в котором находятся данные, то затраты на исполнение такого запроса должны быть малыми ввиду выбора k , поэтому можно ограничиться распараллеливанием на реплики фрагмента отношения.

Если перекос возникает из-за неравномерного распределения данных внутри атрибута разбиения (большая часть значений лежит в пределах малого числа сегментов), то возможно применение функции хеширования к атрибуту разбиения для обеспечения равномерного перемешивания кортежей отношения между узлами системы. При этом не теряется возможность уменьшения диапазона сканируемой части отношения, так как индекс строится по оригинальному значению атрибута. Хеширование также возможно использовать с предложенной выше схемой секционирования данных для случая некратного количества серверов репликации и узлов системы. Для этого узлы разбиения диапазонов необходимо считать значениями хэш-функции, а для определения узла, к которому относится значение атрибута отношения, необходимо только применить к нему хэш-функцию.

При использовании хеширования для разделения отношений возможно возникновение иных планов исполнения запроса (по отношению к планам, основанным на разбиении по диапазону значений атрибута отношения).

В связи с вышесказанным представляется логичным оставлять выбор способа разделения

отношений за пользователем системы.

Рассмотрим запрос с соединением двух отношений.

```
SELECT *  
FROM R1 JOIN R2  
ON R1.A = R2.B
```

В случае, если отношения R1 и R2 являются реплицированными, то в схеме исполнения запроса, описанной в [2], не происходит никаких изменений. Если одно из отношений (для определенности – R1) является секционированным, то возможна следующая схема исполнения запроса. Поскольку отношение R2 является реплицированным, то для проведения операции соединения не требуется получения каких-либо дополнительных данных с других узлов системы, в случае, если отношение R2 не является отношением R1 и связь идет не по атрибуту разбиения отношения. Для получения результатов следует просто объединить локально вычисленные операции соединения. Причем, если не требуется дальнейшей обработки целого массива (например, операции группировки или сортировки), то локально вычисленные данные могут сразу же быть возвращены клиенту независимо от результатов обработки других локальных узлов.

Рассмотрим запрос с использованием оператора группировки кортежей

```
SELECT R.A, sum(R.B) as S  
FROM R  
GROUP BY R.A
```

В случае, если отношение R является реплицированным, то в схеме исполнения запроса, описанной в [2], не происходит никаких изменений. Если отношение является секционированным, то возможна следующая схема исполнения запроса. Следует исполнить запрос на локальных узлах с проведением группировки по соответствующим атрибутам. Далее, для формирования итоговой выборки следует провести дополнительную группировку данных из

полученных фрагментов по атрибутам группировки. В [2] показано, что в таком случае размер промежуточных результатов возрастает не более чем в N раз.

Для получения априорных оценок времени исполнения запросов можно воспользоваться методикой получения временных оценок, приведенной в [4]. Можно показать, что она также применима в случае секционирования одного из отношений схемы.

В настоящей работе описана архитектура и принципы реализации параллельного исполнения запросов в СУБД с использованием репликации данных и фрагментации одного отношения.

Направлением дальнейших исследований является проведение экспериментов по исследованию ускорения и масштабируемости предложенного решения, а также исследование возможности работы с секционированием нескольких отношений и операции соединения секционированного отношения с тем же отношением по атрибуту, отличному от атрибута секционирования.

Литература

1. Локшин, М.В. Построение систем для параллельной обработки запросов к СУБД [Текст] / М.В. Локшин, О.Я. Кравец // Телематика'2004: труды XI Всерос. науч.-метод. конф. – 2004. – С. 94-95.
2. Локшин, М.В. Методы распараллеливания запросов в гетерогенных системах реляционных баз данных [Текст]: монография / М.В. Локшин, О.Я. Кравец. – Воронеж: Научная книга, 2008. – С. 184. – ISBN 978-5-98222-294-7.
3. Локшин, М.В. Исследование надежности RAID-0 массивов в системах с репликацией данных [Текст] / М.В. Локшин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9, № 6.3. – С. 93-97.
4. Локшин, М.В. Методика получения временных оценок исполнения запросов в параллельных СУБД с репликацией данных [Текст] / М.В. Локшин // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 4. – С. 41-44.

Воронежский государственный технический университет

PARALLEL EXECUTION OF SQL-QUERIES IN SYSTEMS WITH DATA REPLICATION AND PARTITIONING

M.V. Lokshin, S.A Rykov

The article is devoted to the problem of construction failover systems based on RAID-0 technology. We modeling work of a computer network using data replication as a tool to enhance system reliability. We get results for systems over to 32 nodes and over to 16 disks arrays

Key words: DBMS, replication, partitioning

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАЗБИЕНИЕ ПЛОСКИХ ОБЛАСТЕЙ НА МАКРОЭЛЕМЕНТЫ В МЕТОДЕ ВНЕШНИХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ АППРОКСИМАЦИЙ

А.А. Успехов, А.С. Троценко, Д.А. Болотцев

В статье рассматривается проблема автоматизации генерации исходных данных для расчётов с использованием МВКА. Предложен алгоритм разбиения детали на макроэлементы произвольной формы. Получены результаты разбиений для характерных плоских фигур с различными параметрами

Ключевые слова: метод конечных элементов, метод внешних конечно-элементных аппроксимаций, макроэлементы

Современный уровень создания конкурентоспособных объектов механики требует применения на стадии технического проектирования эффективных методов компьютерного моделирования. Такой подход позволяет найти оптимальные параметры конструкции изделия с незначительными затратами. Поиск удачного варианта конструкции укладывается в некоторое количество итераций, на каждой из которых инженер проводит моделирование эксплуатационных состояний изделия. МКЭ [1] считается одним из самых распространенных современных методов моделирования.

Тем не менее в результате постоянного роста сложности проектируемых изделий, а также необходимости создания их наилучших вариантов в сжатые сроки становится актуальным использование альтернативного метода моделирования МВКА [2], который в сравнении с МКЭ имеет значительные преимущества – низкие ресурсоемкость и трудоемкость вычислений при той же точности.

Множество достоинств потенциально ставит МВКА на одном уровне с МКЭ, но отсутствие нужных для моделирования автоматизированных средств (препроцессоров) генерации расчетных данных не позволяет широко использовать этот метод в инженерной практике. Согласно специфике МВКА такое средство уместно называть генератором макроэлементов в отличие от аналогичного генератора конечно-элементной сетки в МКЭ.

Следуя МВКА, макроэлемент может быть любой сплошной формы, но в рамках определенного критерия; контур должен быть близ-

ким к прямоугольнику. Совокупное подобие всех макроэлементов такой фигуре определяет точность моделирования. Поэтому требуется разбиение области на множество частей, каждая из которых была бы близка в указанном формальном смысле к прямоугольнику.

Формальное выражение близости строится по очевидным соображениям

$$k = \frac{S_e}{S_r}, \quad (1)$$

где – k критерий близости ($0 \leq k \leq 1$, 0 – минимальная близость к прямоугольнику, 1 – максимальная); S_e – площадь макроэлемента; S_r – наименьшая площадь ограничивающего макроэлемент прямоугольника.

Ключевыми функциями предлагаемого подхода (рис. 1) являются поиск ограничивающего макроэлемента (1) прямоугольника (2) минимальной площади и расщепление соответствующего макроэлемента на две части по линии (3), разделяющей прямоугольник пополам перпендикулярно большей стороне. В результате деления получается два макроэлемента (4).

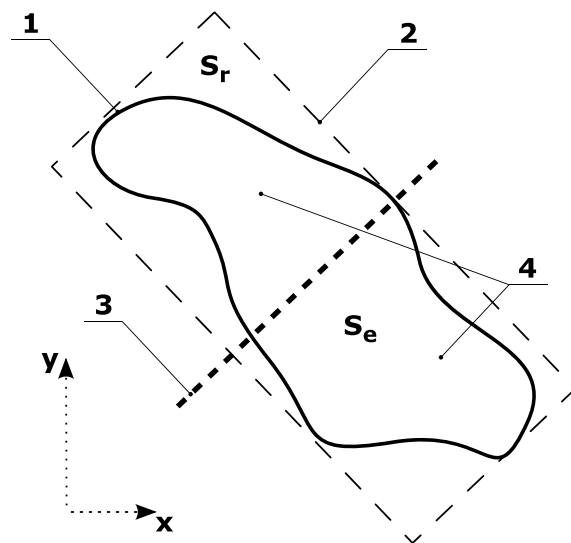


Рис. 1. Схема разбиения макроэлемента

Итерационная структура алгоритма предусматривает рекурсивную процедуру деления макроэлементов на части меньшего размера, начиная с исходной области, до тех пор, пока для всех полученных макроэлементов не будут удовлетворены условия $e < k$ и $S_e > s$, где e – некоторое действительное значение близости к прямоугольнику ($0 \leq e \leq 1$), а s – установленная предельная минимальная площадь макроэлемента. Процесс деления также прекращается для макроэлементов, которые имеют форму, близкую к треугольнику. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

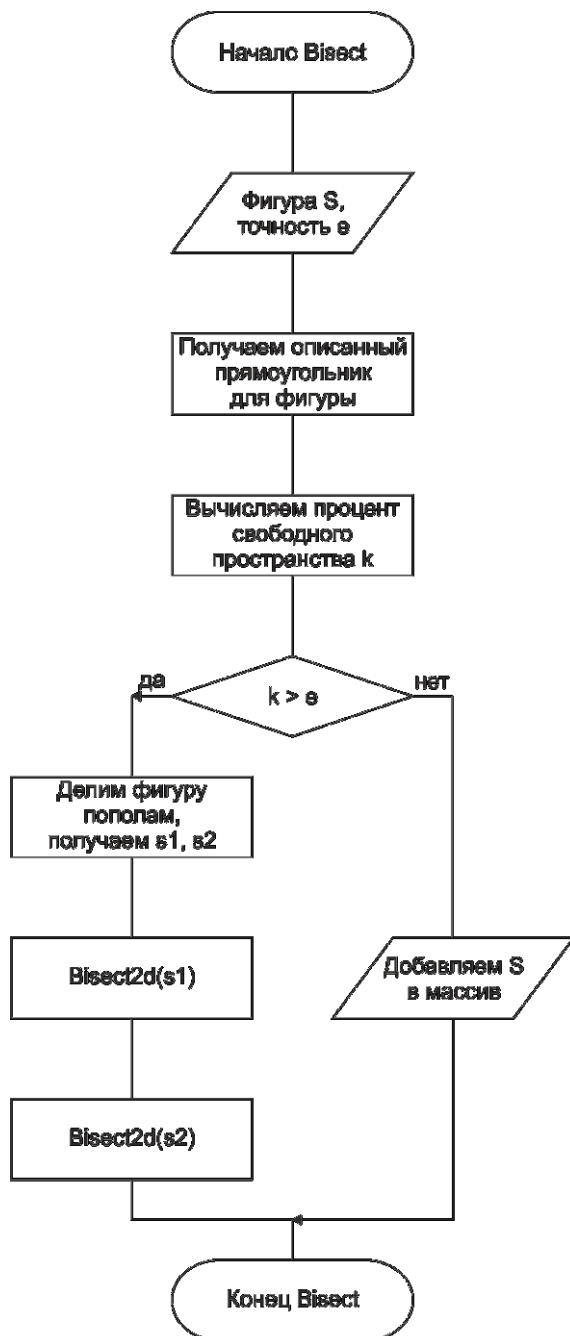


Рис. 2. Блок-схема алгоритма разбиения

В специальных случаях изменение k каждой итерации у треугольных, а также четырехугольных макроэлементов носит периодический характер ($k = const$ в случае прямоугольного треугольника), порождающий проблему сходимости. С целью её преодоления вводится процедура распознавания таких форм макроэлементов и, далее, исключения их из деления (рис. 3).

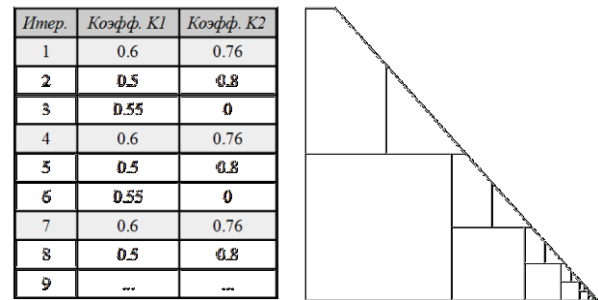


Рис. 3. Картины делений, приводящие к периодическому изменению k

Основной идеей алгоритма распознавания форм, близких к треугольнику, выступает поиск прямолинейных участков на контуре макроэлемента. При поточечном обходе контура с добавлением каждой точки происходит построение ограничивающего прямоугольника. Отношение длин сторон прямоугольника H и L определяет степень кривизны линии на текущем множестве точек. Пример поиска прямолинейного участка показан на рис. 4. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 5.

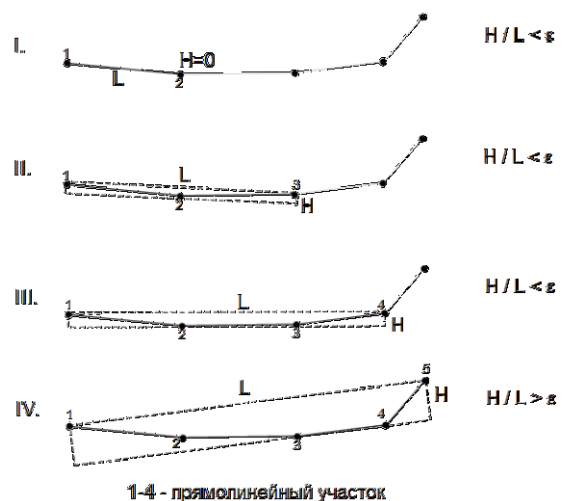


Рис. 4. Схема поиска прямолинейного участка

Однако стоит отметить, что ограничивающий прямоугольник не всегда верно описывает характер изменения кривизны контура. Примером тому может служить ситуация на рис. 6.

Для решения этой проблемы было введено новое условие, заключающееся в следующем: расстояние между начальной и конечной точками множества с добавлением новой точки должно увеличиваться, иначе имеет место сильное искривление.

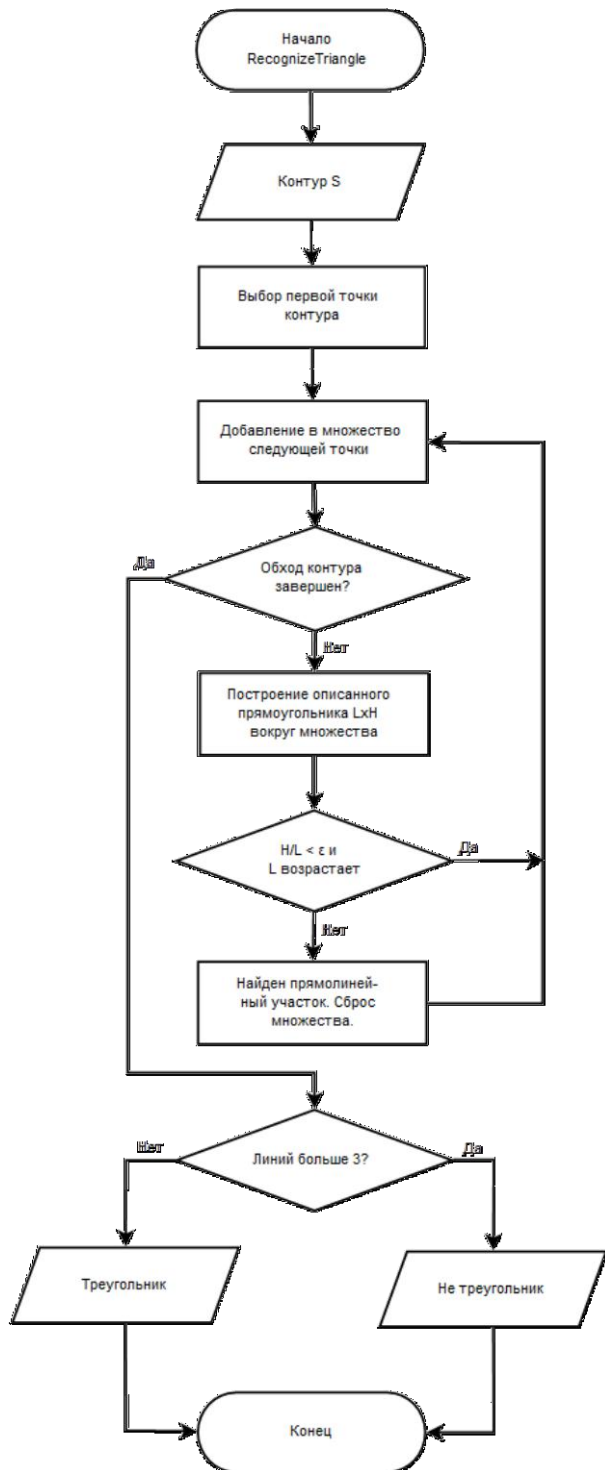


Рис. 5. Блок-схема алгоритма распознавания треугольника



Рис. 6. Исключение в алгоритме распознавания треугольника

В реализации алгоритма разбиения используется *дополнительный функционал* Open-Cascade [3]. Он берет на себя описание областей, предоставляет инструменты их разбиения, производит поиск ограничивающего прямоугольника, выполняет обработку входной и формирование выходной информации.

Методика опробована на множестве форм *характерных* конфигураций с определенными значениями ϵ . Картины различных по форме фигур и соответствующих сеток макроэлементов представлены на рис. 7, 8, 9. Следует обратить внимание на то, как изменяется частота разбиения в зависимости от ϵ , а также на области профилей фигур, где разбиение учащается.

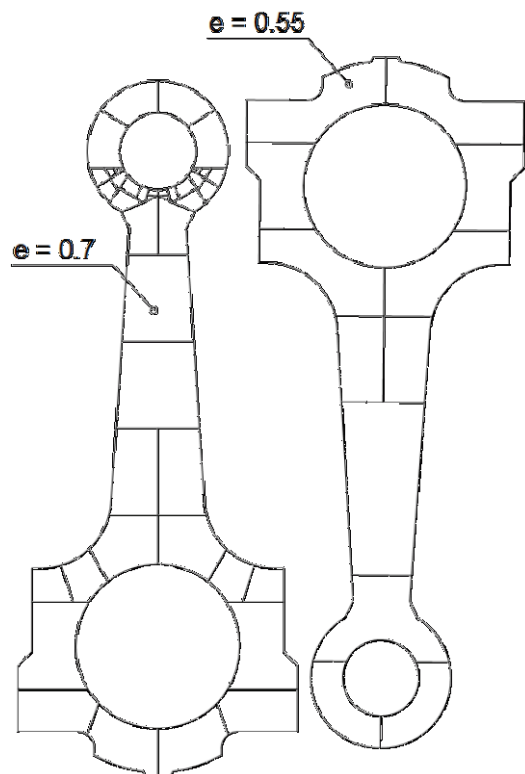


Рис. 7. Варианты разбиений на макроэлементы профиля шатуна

Особенность алгоритма проявляется в *чрезмерном* разбиении макроэлементов при определенных значениях, преимущественно при больших значениях. Таким образом можно установить необходимую частоту разбиения, которая в последующем отразится на произво-

дительности расчетной системы и точности получаемого результата.

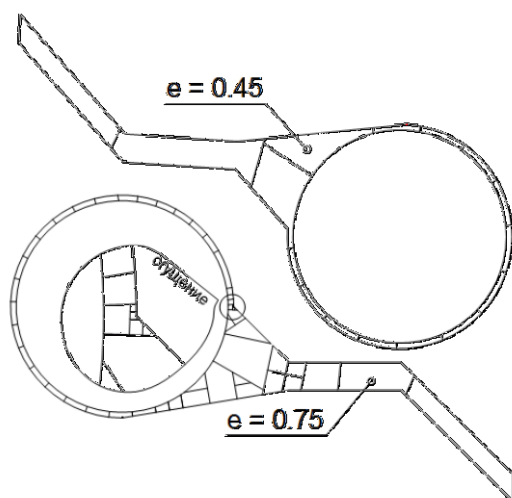


Рис. 8. Варианты разбиений на макроэлементы профиля кольца

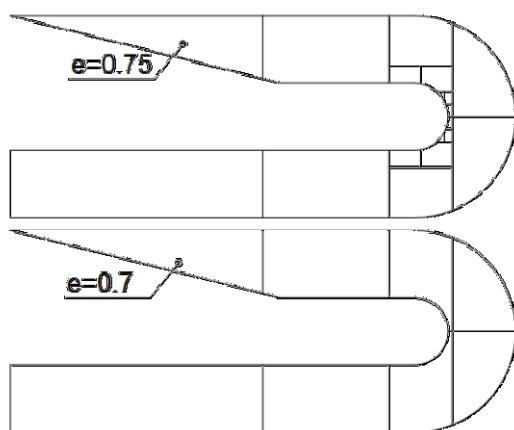


Рис. 9. Варианты разбиений на макроэлементы профиля крючка

Наряду с представленной методикой был опробован еще один способ разбиения на макроэлементы. Так для фигур, имеющих округлую форму или период по внешнему контуру, была опробована схема разбиения на основе полярных координат. Полярные координаты вводят иной принцип рассечения элемента —

по углу и по радиусу. Такой подход позволяет строить более равномерную картину разбиений для форм, имеющих класс круговых. Здесь же была введена система распознавания повторяющихся секторов на внешнем контуре. В этом случае происходит разбиение только одного сектора, а затем результат копируется на остальные (рис. 10).

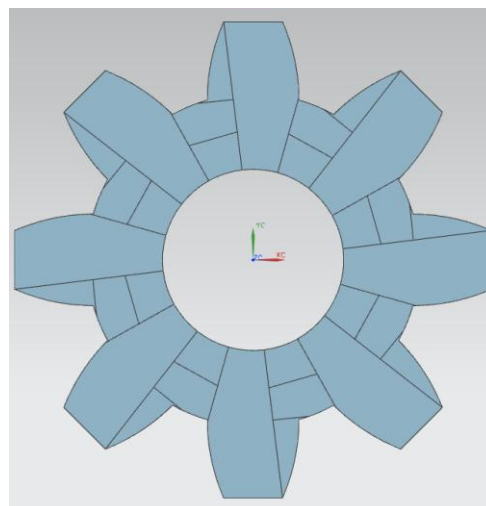


Рис. 10. Пример разбиения с использованием секторного деления в полярных координатах

Выводы. 1. Алгоритм имеет простую структуру, которая легко поддается распараллеливанию. 2. Практическая сходимость предлагаемого метода обеспечивается на плоских областях произвольных конфигураций. 3. Предложенный подход не требует принципиальных дополнений для развития генерации сеток макроэлементов в пространственных областях.

Литература

1. Зенкевич, О.С. Метод конечных элементов в технике [Текст]: пер. с англ. / О.С. Зенкевич. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
2. Апанович, В.Н. Метод внешних конечно-элементных аппроксимаций [Текст] / В.Н. Апанович. — Минск: Вышэйш. шк, 1991. — 171 с.
3. OpenCascade [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL : <http://www.opencascade.org>

ООО «ИНОБИТЕК», г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

AUTOMATIC MACROELEMENT GENERATION FOR PRECISE SOLID METHOD

A.A. Uspekhov, A.S. Trotsenko, V.A. Bolotsev

The article is devoted to the problem of automatic generation input database for Precise Solid Method (PSM). An algorithm partitioning the details into macroelements is given. The splitting of typical parts is done with different parameters

Key words: finite element method, method of external finite-element approximation, precise solid method, macroelements

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА ОБУЧЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ НАКОПЛЕННЫХ ЗНАНИЙ СПЕЦИАЛИСТОВ

А.И. Сукачев, А.В. Барабанов, В.В. Сафронов, А.В. Гаганов

В статье рассмотрен вопрос разработки и использования средств обучения и накопления знаний на этапе внедрения и использования систем электронного документооборота. Представлен вариант курса автоматизированного обучения для ускорения внедрения системы 1С:PDM на предприятии

Ключевые слова: обучение, знание, 1С:PDM

Внедрение систем электронного документооборота (например, с использованием системы 1С:PDM) на производстве является трудоемкой и ресурсо - затратной задачей. Система управления инженерными данными 1С:PDM, разработанная компанией APPIUS, имеет модульную структуру: модуль управления справочной информацией, модуль управления структурой изделия и модуль управления технологией изготовления. Помимо этого, в состав системы включен ряд второстепенных модулей: управление изменениями, управление архивом, нормирование.

Основной концепцией системы является интеграция данных об изделии на базе электронной структуры изделия (ЭСИ), которая может быть сформирована автоматически на основе 3D-модели с использованием соответствующей PLM-компоненты, реализующей обмен данными между 1С:PDM и системой трехмерного моделирования [1].

В качестве системы трехмерного моделирования можно использовать Autodesk Inventor, SolidWorks, SolidEdge, AutoCAD, КОМПАС и др [2-3].

Актуальность создания современной образовательной программы в области работы системы 1С:PDM на предприятии определяется как широкими возможностями этой системы, так и потребностью непрерывного образования специалистов. Система обучения и накопления профессиональных знаний может решать задачи на двух уровнях: первый – позволяющий ускорить процесс перехода на автоматизированные системы управления разработкой изделий; второй – дистанционное образование без отрыва от производства.

Система обучения и накопления профессиональных знаний в области высокотехнологичного производства может состоять из следующих компонентов (рис. 1):

- система управления обучением;

- набор электронных учебных курсов;
- СУБД;
- графическая система (например, Autodesk Inventor);
- система 1С:PDM;
- набор справочников;
- набор современных инженерных проектных решений;
- экспертная система и т.д.

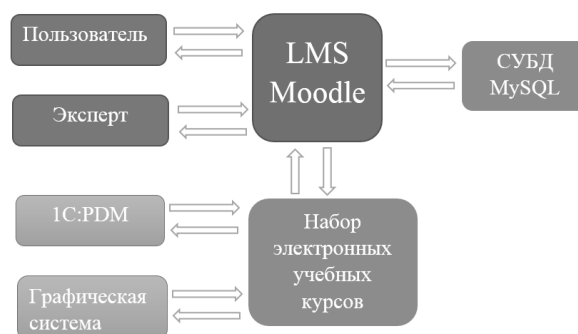


Рис. 1. Пример системы обучения и накопления профессиональных знаний

Интерактивные средства обучения включают в себя систему управления обучением (LMS) и набор электронных учебных курсов (ЭУК).

Система управления обучением реализует следующие функции:

- учет слушателей, персонализация, разграничение прав доступа;
- управление процессом обучения, учет результатов обучения и тестирования;
- интеграция с механизмами синхронного и асинхронного общения;
- подготовка аналитической отчетности.

В настоящее время существуют множество систем управления обучением: Moodle, WebTutor, ATutor и др.

Инструментальные средства, применяемые при проектировании ЭУК, должны обеспечивать следующие возможности:

- обеспечивать ввод, редактирование и форматирование текста (текстовый редактор);
- вести подготовку иллюстрированной части ЭУК (графический редактор);
- формировать сценарий диалога между пользователем и системой;

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

Барабанов Александр Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: bav@mail.ru

Сафронов Виталий Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vitolik@bk.ru

Гаганов Александр Владимирович – ВГТУ, директор НОЦ, тел. (473) 246-12-07

- формировать структуру ЭУК;
- обеспечивать связь с внешней средой (операционной системой) и другими программными модулями;
- формировать различной формы вопросы и производить обработку ответов;
- вести сбор, обработку и отображение статистики по результатам обучения;
- создавать библиотеку графических изображений ЭУК.

Одной из таких систем является Learning manager system (LMS) «Moodle», которая предназначена для автоматизированного контроля качества усвоения информации. Система функционирует в интерактивном режиме в реальном масштабе времени. При работе с Moodle от пользователя не требуется профессиональных знаний в области применения средств вычислительной техники.

Система может содержать неограниченное количество учебных модулей, что способствует накоплению знаний на предприятии. Пользователь имеет возможность отвечать на любое количество вопросов в пределах одной темы. Количество контрольных вопросов и время ответов задается в режиме настройки программы.

Данная система обеспечивает случайную выборку и предъявление вопросов, ввод ответов пользователя, анализ правильности ответов, выдачу результатов контроля для одного пользователя или группы пользователей.

За счет применения в системе генератора случайных чисел все вопросы и варианты ответов перемешиваются, нумеруются заново, и на экране появляется индивидуальная последовательность вопросов для каждого пользователя.

При организации учебного курса в системе LMS «Moodle» страница курса называется кадром. По размерам кадр – это видимая часть экрана дисплея. Кадры подразделяются на информационные и контролирующие, в которых пользователю задается вопрос.

Банк вопросов курса состоит из сотен вопросов, которые объединены тематически в набор тем. Каждая тема может содержать неограниченное число вопросов (обычно до ста) приблизительно одной степени сложности. Правильный ответ на вопрос оценивается в один балл. Неправильный ответ приносит ноль баллов.

В режиме «Тестирование по выбранному курсу» вызывается программа, которая при помощи генератора случайных чисел выдает набор вопросов и вариантов ответов. В эти наборы вопросов входят вопросы из всех тем, причем количество вопросов из одной темы одинаково для каждого пользователя. В результате наборы из вопросов не повторяются, но имеют одну степень сложности.

В курсе контроля знаний ответы сопровождаются звуковыми сигналами «неправильно» или «правильно», ведется учет заданных вопросов и правильных ответов. Затем происходит переход к кадру со следующим

вопросом. Нельзя вернуться (например, листанием кадров) к вопросу, на который производится ответ.

Завершается контролирующая часть программы появлением кадра с результатами проверки знаний. Максимальное количество баллов, которое можно получить, ответив на набор вопросов, равно количеству вопросов (минимальное число баллов равно 0).

Оценка формируется в зависимости от количества правильных ответов (в процентах) и устанавливается преподавателем в соответствующем справочнике.

Электронный учебный курс включает в себя набор лекционного, видео, тестового материала. Структура электронного учебного курса представлена на рис. 2.

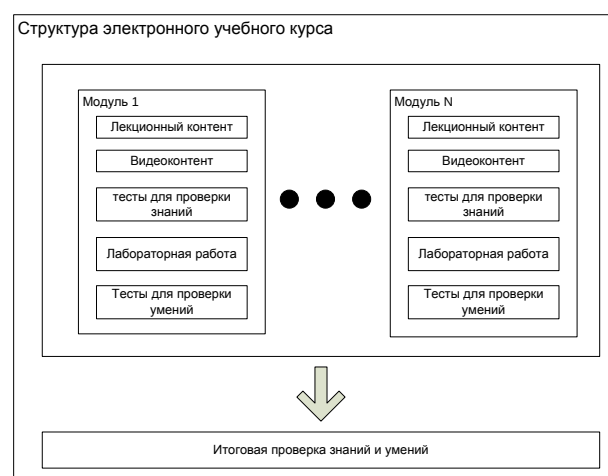


Рис. 2. Структура электронного учебного курса

Обычно в рамках проекта «разработка автоматизированной системы дистанционного обучения» проводится:

- анализ существующих систем управления дистанционного обучения (LMS);
- разработка структуры дистанционного курса с учетом специфики предприятия;
- разработка учебно-методической части дистанционного обучения;
- установка и настройка на сервере предприятия автоматизированной системы дистанционного обучения;
- апробация на предприятии автоматизированной системы дистанционного обучения.

В рамках обзора существующих систем управления дистанционным обучением проведен анализ популярных LMS систем (moodle, webtutor, eLearning Server и т.д.) и выбор LMS системы и структуры учебного курса с учетом специфики предприятия. Основной целевой аудиторией для разрабатываемой программы должны стать следующие три группы специалистов: конструкторы; архивариусы; администраторы.

Дистанционный курс состоит из общего цикла и трех вариативных профильных модулей. Общий цикл включает в себя базовые принципы и понятия,

связанные с работой системы 1C:PDM: знакомство с 1C:PDM; знакомство с интерфейсом 1C:PDM; структура ЭСИ в системе 1C:PDM.

Второй этап образовательной программы включает в себя как теоретический материал (лекционный материал, мультимедийный контент, методические руководства), так и выполнение практических работ, эмитирующих работу системы на предприятии в дистанционном режиме.

Профильный модуль «Работа конструктора в системе 1C:PDM» включает в себя следующие функциональные узлы:

- экспорт ЭСИ из Autodesk Inventor в 1C:PDM;
- управление структурой изделия;
- конструкторско-технологический справочник;
- проведение извещений;
- работа с ревизиями.

Профильный модуль «Работа архивариуса в системе 1C:PDM» состоит из следующих функциональных узлов:

- регистрация десятичных номеров;
- электронные инвентарные книги;
- карточки учета документов;
- заявка на тиражирование;
- выдача копий;
- возврат документации.

Профильный модуль «Работа администратора в системе 1C:PDM» включает в себя следующие функциональные узлы:

- создание нового пользователя и настройка доступа;
- работа со справочниками;
- работа с дескрипторами безопасности;
- настройка PLM компоненты;
- настройка конструкторско-технологических справочников (KTC).

Учебно-методическая часть включает в себя:

- лекции (не менее 30 часов);
- тестовые задания (не менее 30 тестовых заданий);
- контрольные вопросы (не менее 20 вопросов);
- мультимедийный контент (не менее 30 видео фрагментов);
- интерактивные мультимедийные справочники (не менее 25 страниц для каждого).

На сервере предприятия производятся установка и настройка:

- установка LMS системы;
- установка и настройка СУБД;
- настройка интерфейса LMS;
- загрузка дистанционного курса в LMS;
- тестирование работы дистанционного курса;
- апробация системы сотрудниками предприятия.

Для освоения теоретических знаний используется система LMS Moodle. В частности, для этой системы были разработаны учебные курсы: работа конструктора в системе 1C:PDM, работа архивариуса, администрирование системы. Для приобретения практических умений по этому курсу используется набор систем 1C:PDM, системы трехмерного моделирования и PLM компонента, связывающая системы 1C:PDM и Autodesk Inventor.

Структура разработанного объединенного курса «Основы работы в системе 1C:PDM» представлена на рис. 3.

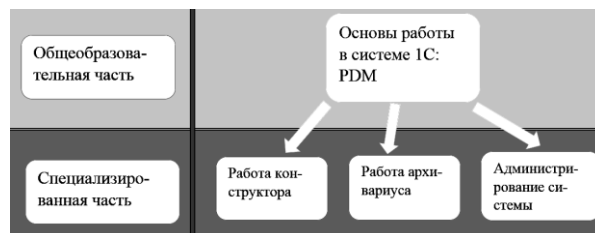


Рис. 3. Структура курса по работе в системе 1C:PDM

Как видно из рис. 3, курс разделен на две части: общеобразовательная и специализированная.

Общеобразовательная часть необходима для знакомства сотрудников предприятия с функциональными возможностями программного продукта, а также для приобретения умения по работе с системой 1C:PDM.

В специализированной части рассмотрены алгоритмы работы сотрудников предприятия в системе 1C:PDM. Специализированную часть можно условно разделить на три группы: работа конструктора, работа архивариуса, работа администратора.

Под работой конструктора понимается создание электронной структуры изделия, а также перевод ее в состояние «в Архиве». Под работой архивариуса понимается ведение электронного архива, т.е. создание и ведение карточек учета на каждое изделие, а также контроль выдачи копий документов.

Под администратором понимается администрирование системы 1C:PDM, т.е. создание и редактирование пользователей, а также настройка системы 1C:PDM в целом.

На рис. 4 представлен интерфейс разработанной системы накопления знаний.

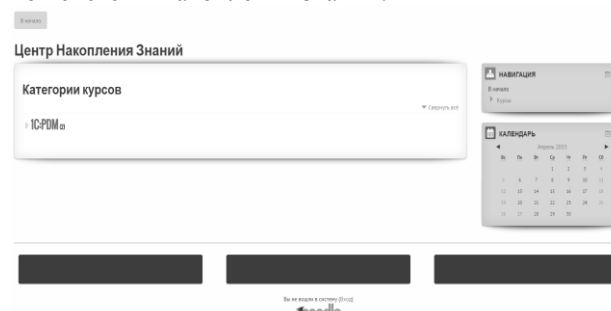


Рис. 4. Интерфейс системы накопления профессиональных знаний

Следует отметить, что использование системы обучения и накопления профессиональных знаний специалистов на предприятии уменьшает время внедрения программных продуктов, а также позволяет постоянно повышать профессиональный уровень разработчиков.

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. 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. Принципы построения системы интерактивного проектирования технологических процессов [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, А.Д. Поваляев, Н.И. Гребенникова, В.В. Сафронов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. – Т. 10. - № 5. - С. 64-66.
3. Концепция бесшовной интеграции управленческих систем [Текст] / В.В. Сафронов, В.Ф. Барабанов, А.Д. Поваляев, А.В. Гаганов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. – Т. 9. - № 6.1. - С. 34-40.

Воронежский государственный технический университет

INFORMATION AND LEARNING TOOLS CONSERVATION OF SPECIALIST KNOWLEDGE

A.I. Sukachev, A.V. Barabanov, V.V. Safronov, A.V. Gaganov

Abstract: The paper deals with the development and use of learning and knowledge during the implementation and use of electronic document management systems. A version of the course-balanced, automated learning to accelerate the introduction of 1C: PDM in the enterprise

Key words: education, knowledge, 1C: PDM

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА НЕЧЁТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ

А.А. Спирячин, В.Л. Бурковский, А.П. Воропаев

В статье анализируется возможность применения нечёткой классификации и генетических алгоритмов в интеллектуальной системе поддержки принятия врачебных решений

Ключевые слова: нечёткая классификация, генетические алгоритмы, интеллектуальная медицинская система

Интеллектуальные системы поддержки принятия врачебных решений выполняют функции повышения качества врачебного обслуживания в условиях лечебных учреждений. В статье предлагается обобщённая модель принятия врачебных решений, основными компонентами которой являются: анализ лабораторных данных, постановка диагноза, выбор тактики лечения, динамическая корректировка тактики лечения с учётом индивидуальных реакций организма пациента на основе прогнозирования, фиксация требуемого состояния пациента, учёт всех принятых врачом решений.

Алгоритмическая обобщённая модель [1] интеллектуальной системы состоит из последовательных шагов от анализа данных до фиксации требуемых результатов.

Постановка корректного диагноза является одним из важных и необходимых условий для корректной работы системы в целом.

Постановка корректного диагноза сводится к задаче классификации, то есть соотнесению лабораторных данных, жалоб пациента с определённым известным классом заболевания.

При определении класса заболевания недостаточно одного признака, поскольку организм человека является достаточно сложной системой с множеством влияющих друг на друга факторов. Поэтому диагноз – результат многомерной классификации.

Цель постановки диагноза сводится к построению модели, которая по вектору входных признаков получает выходное значение – соотнесение с определённым классом, т.е. заболеванием.

Достижение данной цели обусловлено выполнением обязательных этапов: конструирование модели и её использование.

Первый этап в построении классификатора признаков заболевания осложняется тем, что нет однозначного соотнесения определённых признаков

с определённым заболеванием, к тому же непротиворечивым. Признаки могут выражаться как количественно, так и качественно. Под качественным выражением будем понимать некоторые лингвистические значения признака (например, сильная боль).

Пусть X – множество симптомов заболеваний и типов лабораторных показателей, а Y – множество известных заболеваний.

Пусть также имеются данные о том, что определённые симптомы встречаются для определённых заболеваний как чётко, так и нечётко (часто, нечасто и т.д.), составляющие базу правил.

База правил системы нечёткого вывода основывается на понятиях t -нормы (операция конъюнкции) и t -конормы (операция дизъюнкции).

Постановка диагноза состоит в построении отображения f :

$$X \rightarrow Y, f(x_i) = y_i. \quad (1)$$

Следует отметить, что диагноз не обязательно будет идентифицировать одно заболевание. Заболеваний в диагнозе может быть несколько, если результатом многомерной классификации будет несколько наборов классов.

Многомерная классификация над нечёткими множествами является нечёткой классификацией.

Нечёткая классификация может быть выполнена с использованием нечёткой нейронной сети.

Модель нечёткой нейронной сети для целей нечёткой классификации состоит из системы нечёткого вывода и собственно нейронной сети.

Нечёткое множество характеризуется функцией принадлежности. Пусть $MF_c(x)$ – степень принадлежности к нечёткому множеству C . То есть функция принадлежности – обобщение понятия характеристической функции обычного множества. Тогда нечёткое множество C – множество упорядоченных пар вида

$$C = MF_c(x) / x, \quad (2)$$

где $MF_c(x) \in [0,1]$.

При $MF_c(x) = 0$ элемент множества x не принадлежит множеству C , при $MF_c(x) = 1$ – полностью принадлежит.

Спирячин Александр Александрович – ВГТУ, аспирант, e-mail: spirjachin@rambler.ru

Бурковский Виктор Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 246-59-98

Воропаев Александр Петрович – ВГТУ, ст. преподаватель, e-mail: vap-vgtu@mail.ru

Пересечение нечётких множеств обозначается минимумом из значений функции принадлежности.

Объединение множеств – максимум значений функции принадлежности.

Системы нечёткого вывода преобразуют значения входных переменных в выходные с использованием нечётких правил продукций. Нечёткий вывод состоит из нескольких этапов.

Первым этапом является формирование базы правил системы нечёткого вывода. База правил системы нечёткого вывода является основой операций нечёткого вывода. Она содержит нечёткие высказывания в форме «Если – то» и функции принадлежности для лингвистических термов. При этом обязательными условиями являются: наличие хотя бы одного правила для каждого лингвистического термина выходной переменной и по крайней мере одного для любого термина входного значения, в котором этот терм используется в качестве предпосылки, то есть левой части правила.

Второй этап – фазификация входных переменных, так называемое введение нечёткости. Введение нечёткости состоит в установке соответствия между численным значением входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей термина лингвистической переменной. При фазификации значениям всех входных переменных системы нечеткого вывода, полученным внешним по отношению к системе нечеткого вывода способом, ставятся в соответствие конкретные значения функций принадлежности соответствующих термов, используемых в антецедентах ядер нечетких продукционных правил. Фазификация считается выполненной, если найдены степени истинности всех элементарных логических высказываний «b есть a».

Следующий этап – агрегирование, то есть определение степени истинности для каждого правила системы нечёткого вывода. Чаще всего условие правила является составным высказыванием, его истинность определяется с использованием значений элементарных высказываний из состава правила при помощи логических операций в определённом базисе.

Активизация подзаклучений в нечётких правилах продукций представляет собой нахождение истинности для каждого консеквента нечётких продукционных правил. Для простых нечётких высказываний в составе консеквента показатель истинности определяется произведением весового коэффициента и истинности антецедента, для сложных – алгебраическим произведением весовых коэффициентов и степени истинности каждого элементарного высказывания в выводе.

Функции принадлежности $\mu(y)$ каждого из элементарных подзаклучений консеквентов находятся при помощи одного из методов нечеткой композиции.

Min-активизация:

$$\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}. \quad (3)$$

Prod-активизация:

$$\mu(y) = c\mu(x). \quad (4)$$

Average-активизация:

$$\mu(y) = 0.5(c + \mu(x)). \quad (5)$$

Аккумуляирование заключений нечётких правил продукций состоит в нахождении функции принадлежности для каждой выходной лингвистической переменной.

Последним этапом является дефазификация, которая предполагает переход от функции принадлежности лингвистической переменной к её чёткому числовому значению.

Существуют различные алгоритмы, используемые в системах нечёткого вывода: алгоритм Мамдани, алгоритм Цукamoto, алгоритм Ларсена [2].

Нечёткая нейронная сеть представляется несколькими видами слоёв нейронов.

Входной слой используется для формирования степеней принадлежности входных переменных к нечётким множествам, входящим в правила системы нечёткого вывода.

Следующий вид слоёв – это слои, соответствующие правилам, где каждый нейрон выполняет операции t-нормы или t-конормы.

Эти два вида слоёв являются нечёткими.

Остальные слои обычных нейронов выполняют функции взвешенного суммирования значений выходом нечётких нейронов и активации с помощью сигмоидов.

Для целей обучения нечёткой нейронной сети эффективным является так называемый гибридный метод, сочетающий преимущества метода обратного распространения ошибки и генетического алгоритма для минимизации ошибки.

Генетический алгоритм является эвристическим алгоритмом, который используется при решении задач оптимизации. В основе алгоритма лежат случайный подбор и комбинирование искоемых параметров. Механизмы подбора аналогичны механизмам естественного отбора в природе. Поэтому данный алгоритм – разновидность эволюционных вычислений с использованием операций наследования, мутации, отбора и кроссинговера.

Для получения более правдоподобных результатов предлагается обучать и использовать одновременно несколько нейронных сетей, отличающихся функциями активации нейронов, функциями t-нормы и t-конормы, а также количеством слоёв и нейронов в них, то есть структурой. При классификации будут использоваться все обученные сети. Результаты будут формироваться на основе степени доверия. Поскольку система имеет обратную связь с лицом,

принимающим решения, который может оценивать каждый шаг системы, то можно сформировать массив коэффициентов доверия к результатам.

Каждому классу заболевания соответствует несколько тактик лечения.

Каждая тактика лечения выработана специалистами и может характеризоваться, например, классами рекомендаций и уровнями доказательности. Данные показатели целесообразно использовать при выборе тактики лечения таким образом, чтобы самые рекомендуемые и самые доказательные использовались в первую очередь.

Тактики лечения состоят из определённого вида рекомендаций, например: изменение образа жизни, изменение рациона питания, медикаментозная терапия. Однако рекомендации имеют противопоказания. Противопоказания обычно запрещают использование данной рекомендации (например, применение определённого лекарства) при наличии определённых заболеваний. Поэтому, помимо того, что каждому классу заболевания будет соответствовать множество тактик лечения, также ему будет соответствовать множество противопоказаний. Таким образом, множество противопоказаний будет формироваться из некоторых элементов множества определённой тактики лечения.

После постановки диагноза с использованием нечёткой классификации осуществляется выбор тактики лечения с учётом противопоказаний.

Пусть A^0 и B – заболевания, обнаруженные у пациента, причём A^0 – основное заболевание, лечение которого будет проводиться, B – сопутствующее заболевание. A_{pr} – одна из множества тактик лечения для заболевания A^0 , которая характеризуется тремя разнородными элементами $k_{req(A)}$, $k_{doc(A)}$, A_{req} , и сумма $(k_{req(A)} + k_{doc(A)})$ является максимальной из всех сумм, полученных для каждой тактики лечения заболевания A^0 , где k_{req} – составной коэффициент, соответствующий классу рекомендации для определённой тактики лечения и его значимости при выборе, k_{doc} – составной коэффициент, соответствующий уровню доказательности тактики лечения и его значимости при выборе, A_{req} – множество рекомендаций для тактик лечения заболевания A^0 ; A_{pr} и B_{pr} – множества противопоказаний для заболеваний A^0 и B , тогда выбор тактики лечения на первой итерации сводится к выбору:

$$A^0 \wedge B \rightarrow (A_{req} / (A_{pr} \cup B_{pr})). \quad (6)$$

Выбор тактики лечения – итерационный процесс.

Итерации повторяются через периоды, которые являются достаточными для определения тенденции динамики контролируемых параметров.

Если тенденция положительная, то проверяется, достигнут ли терапевтический эффект.

Если он достигнут, то алгоритм останавливается, если нет – то продолжает итерации с той же тактикой лечения. Если тенденция отрицательная, то будет выбрана тактика лечения со следующим по величине значением суммы $(k_{req} + k_{doc})$. Под положительной тенденцией понимается уменьшение разницы между величинами контролируемых параметров – текущей и требуемой.

Поскольку требуется максимальная безопасность здоровья пациентов от влияния рекомендаций выбранной тактики лечения, то предлагается использовать нейронную сеть для прогнозирования значений контролируемых параметров.

Пусть на входы нейрона поступают известные значения контролируемых параметров $x_1, x_2, \dots, x_n$, где n – количество входов нейрона, соответствующее количеству контролируемых параметров.

Синапсы характеризуются пропускной способностью каналов, а именно коэффициентами $w_1, w_2, \dots, w_n$.

Состояние нейрона на выходе сумматора определяется формулой

$$s = \sum_{i=1}^n x_i w_i. \quad (7)$$

Затем состояние аксона определяется значением активационной функции, то есть значение выхода есть зависимость от сумматора:

$$Y = f(s). \quad (8)$$

В качестве активационной функции могут быть использованы различные функции.

Логистическая функция:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-as}}. \quad (9)$$

Модифицированный гиперболический тангенс:

$$f(s) = mths = \frac{e^s - e^{-s}}{e^{as} + e^{-bs}}, \quad (10)$$

где $a, b > 1$.

Используется масштабированная по оси ординат до $[-1; 1]$ функция, которая позволяет получить семейство сигмоидальных функций.

Функции активации характеризуются тем, что способны усиливать сильные сигналы, но не насыщаться от слабых. В терминах нейронных сетей это называется возбуждением и торможением нейрона.

Варьирование выбора функций и выбора их параметров позволит выбрать наиболее подходящую нейронную сеть для прогнозирования.

Для успешного прогнозирования нейронная сеть должна быть обучена.

При этом нейронная сеть будет задействована только после достаточного обучения в цикле. Предлагается для каждого набора выявленных заболеваний хранить и обучать свою отдельную нейронную сеть. Обученная нейронная сеть будет задействована, только если она была обучена прогнозированию именно с таким набором заболеваний.

Под обучением понимается процесс адаптации сети к предъявляемым эталонным образцам путем модификации весовых коэффициентов-связей между нейронами, то есть решается многопараметрическая задача нелинейной оптимизации. Сети предъявляются входные данные как набор параметров, а в качестве выходных – следующий набор. Таким образом, обученная нейронная сеть будет способна спрогнозировать следующий набор.

Лицу, принимающему решение, предполагается предоставлять выбор, учитывать ли результаты прогнозирования в определении тенденции динамики контролируемых параметров.

Важным аспектом практической реализации интеллектуальных систем поддержки принятия врачебных решений является применение облачных технологий, которые позволят производить интеллектуальный анализ больших данных. Интеллектуальный анализ этих данных позволит интеллектуальной системе повысить качество решений. При этом нагрузка между компьютерами, входящими в «вычислительное облако», может распределяться автоматически.

Облачные технологии в настоящий момент являются одним из самых быстрорастущих сегментов IT-рынка, поскольку компаниям не нужно покупать дорогостоящее программное обеспечение: осуществляется лишь аренда сервисов. Преимуществом также является экономия на стоимости IT-оборудования, лицензии, обслуживании и интеграции со сторонними системами принятия решений [3].

Концепция облачных вычислений чаще всего предполагает то, что программы выдают результаты работы в окно стандартного веб-браузера на

локальном компьютере, при этом данные программы запускаются и хранят данные на серверах, входящих в «вычислительное облако».

Описанные преимущества использования облачных технологий позволят в итоге предоставлять пациентам персонализированное лечение. Программное обеспечение как услуга [4] в облачных технологиях может быть предоставлено из любой точки мира, где есть доступ к глобальной сети Интернет. При этом требования к вычислительным мощностям клиентов минимальны, поскольку требуют лишь наличия браузера или мобильного приложения-клиента, соединяющегося по сети с одним или несколькими облачными серверами [5].

Литература

1. Спирычин, А.А. Интеллектуальная система принятия решений в условиях выбора тактики лечения хронических заболеваний на основе облачных технологий [Текст] / А.А. Спирычин, В.Л. Бурковский // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5-1 - С. 57-60.
2. Круглов, В.И. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети [Текст] / В.И. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. - М.: Физ.мат. лит., 2002. - С. 312.
3. Спирычин, А.А. Проблематика использования облачных технологий в системах принятия решений [Текст] / А.А. Спирычин, Д.Э. Елизаров, В.Л. Бурковский // Прикладная математика, механика и процессы управления. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2014. - С. 150.
4. Спирычин, А.А. Структура медицинской информационной системы на базе облачных технологий [Текст] / А.А. Спирычин, В.Л. Бурковский // Перспективные исследования и разработки в области информационных технологий и связи: труды Всерос. конф. - Воронеж: IV Воронежский форум инфокоммуникационных и цифровых технологий, 2014. - С. 17-18.
5. Спирычин, А.А. Моделирование информационной системы управления процессами принятия решений на основе облачных технологий в здравоохранении [Текст] / А.А. Спирычин, В.Л. Бурковский // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2014): сб. трудов VII Междунар. науч. конф. Воронеж: Научная книга, 2014. - С. 358-360.

Воронежский государственный технический университет

ANALYSIS OF EFFECT OF USING THE FUZZY CLASSIFICATION AND OF THE GENETIC ALGORITHMS USED IN THE INTELLIGENT MEDICAL DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM

A.A. Spiryachin, V.L. Burkovsky, A.P. Voropaev

The article examines the possibility of using the fuzzy classification and the genetic algorithms in the intelligent medical decision-making support system

Key words: fuzzy classification, genetic algorithms, medical intelligent system

БАЗА ПРАВИЛ ДЛЯ НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Т.М. Леденева, В.В. Кашко

В статье представлены результаты разработки нечеткой системы управления, которая обеспечивает движение мобильного робота к цели с объездом препятствий

Ключевые слова: мобильный робот, нечеткая система управления, база продукционных правил

Введение

Под мобильным роботом понимается механизм, способный перемещаться в окружающем пространстве с определённой степенью автономии, которая связана с внешними датчиками, предоставляющими информацию об окружающей среде [1].

Цель исследования заключается в разработке структуры навигационной системы управления (НСУ) мобильным роботом, которая обеспечивает его движение к цели без столкновения с препятствиями, на основе принципов нечеткого управления [2,3].

Общая задача навигации включает две подзадачи [4,5]: планирование глобального пути к цели и планирование локального движения.

Можно выделить следующие основные действия, выполняемые роботом при его движении к цели:

- движение вдоль определенной траектории согласно выбранному направлению;
- объезд выпуклых препятствий, возникающих на пути движения робота до целевой точки.

При выполнении перечисленных действий робот должен «знать» не только координаты начальной (x_0, y_0) и целевой (x^*, y^*) точек, но и координаты текущей точки (x_t, y_t) , в которой он находится в данный момент времени t . Тогда, если положение целевой точки известно и известно текущее положение робота, то для выявления факта достижения цели достаточно сравнить соответствующие координаты. Возникновение препятствий на траектории движения будем рассматривать как состояние окружающей среды.

Для моделирования поведения робота введем ряд предположений:

1. В начальной точке (x^0, y^0) робот ориентирован на целевую точку (x^*, y^*) , координаты которой известны, при этом соответствующее направление будем называть основным. Корректировка всех направлений движения робота будет осуществляться относительно основного направления. Возможное

направление движения характеризуется углом отклонения от основного направления.

2. Робот движется с постоянной скоростью v , причем его движение дискретно во времени, тогда за время Δt робот переместится в выбранном направлении на расстояние $v\Delta t$.

3. Для определения имеется ли препятствие на пути робота к цели, используется ультразвуковой дальномер, угол обзора которого изменяется в диапазоне от 0 до 180 градусов. С помощью этого датчика можно определить не только наличие препятствия, но и расстояние до него, при этом, поскольку робот имеет определенные размеры, то необходимо знать не только действительное расстояние $Dist^{real}(t)$, но и безопасное $Dist^{safe}(t)$.

4. Будем считать, что препятствия имеют выпуклую форму, при этом для объезда препятствий можно использовать правый или левый поворот.

Варианты поведения мобильного робота определяются реакцией на следующую информацию: показания сенсоров, данные о состоянии робота, информация о пути.

1. Структура навигационной системы управления

В рамках целенаправленного движения робота можно выделить две основные формы поведения: обход препятствий и следование по заданному пути. Роль нечеткого управления заключается в представлении стратегии управления поведением в форме продукционных (лингвистических) правил, подходящих для определенного поведения.

Цель управления заключается в том, что нечеткие рекомендации управления, генерируемые для каждого типа поведения, комбинируются для разработки управляющего воздействия на приводы робота [5]. Структура НСУ представлена на рис. 1. Заметим, что она включает две нечеткие системы управления, которые проектируют режим движения к цели и режим объезда препятствий. НСУ переключается между двумя режимами в зависимости от расстояния до препятствия.

Основной алгоритм выполняется в каждом цикле управления и состоит из следующих четырех этапов:

1. Запуск движения в направлении цели с заданной начальной скоростью v_0 .
2. Определение расстояния с помощью датчика.

3. Если обнаружено препятствие, то перейти к шагу 4, иначе перейти к шагу 5.

4. Проверка необходимости управляющего воздействия (изменить скорость? изменить направление?). Если необходимости нет, то перейти к шагу 2, иначе к шагу 5.

5. Определить допустимое направление движения и перейти к шагу 6.

6. Движение со скоростью v в заданном направлении в течение промежутка времени Δt .

При движении робота учитываются как запрещенные, так и разрешенные направления во избежание возможных потерь информации в синтезе команды.

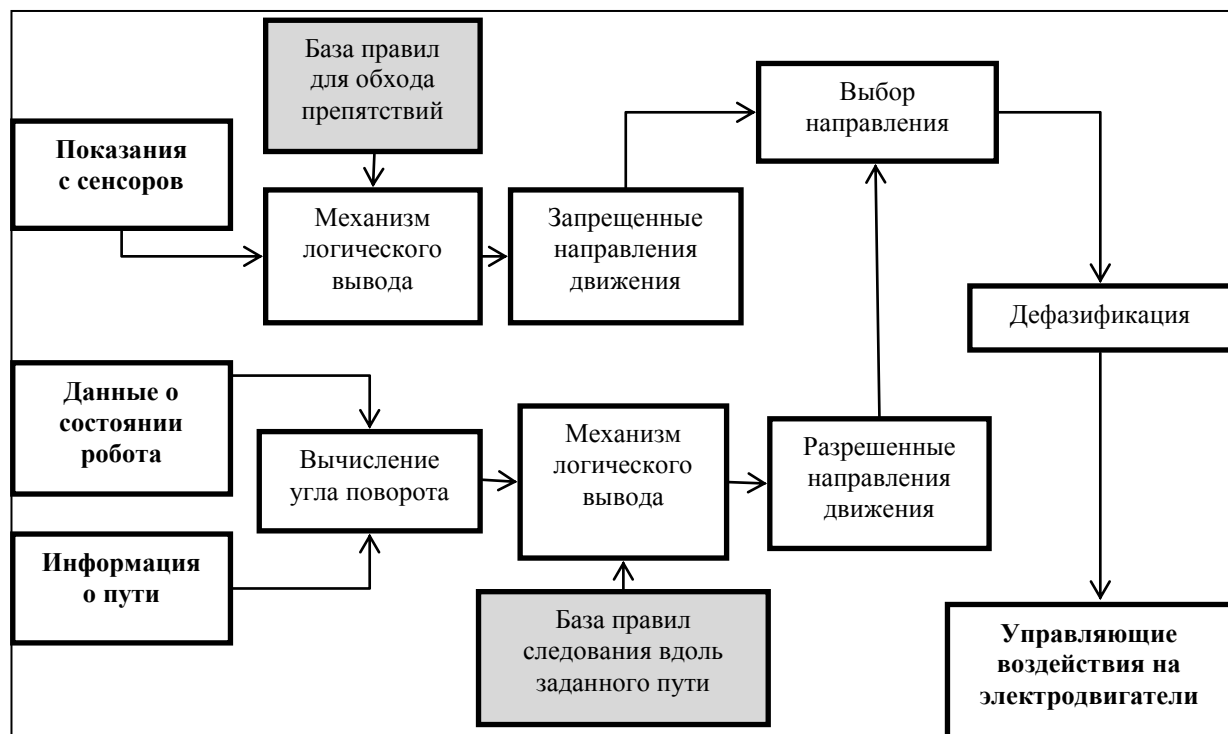


Рис. 1. Структура навигационной системы управления

2. Вычисление угла поворота при объезде препятствий

Пусть в проекции робот представляет собой прямоугольник. Будем считать, что его центр тяжести с координатами (x_t, y_t) определяет положение робота в текущий момент времени t . Также в координатной плоскости определим координаты целевой точки (x^*, y^*) , которая служит для робота перспективной целью, и координаты начального положения (x_0, y_0) .

Уравнение прямой, соединяющей начальную и целевую точки, имеет вид

$$y = \frac{y^* - y_0}{x^* - x_0} \cdot x + \frac{y_0 x^* - x_0 y^*}{x^* - x_0} = k_0 x + b_0. \quad (1)$$

Прямая (1) определяет начальное целевое направление. Угол θ , который образован целевой прямой (1) и прямой, проходящей через центр тяжести робота, назовем *целевым* углом.

Ориентация на цель (x^*, y^*) может быть определена из любой текущей точки (x_t, y_t) , в

которой находится робот в момент времени t . Прямую, проходящую через точку (x_t, y_t) и цель (x^*, y^*) , назовем *текущим целевым направлением*. Прямая, определяющая текущее целевое направление в момент времени t , задается уравнением

$$y = \frac{y^* - y_t}{x^* - x_t} \cdot x + \frac{y_t x^* - x_t y^*}{x^* - x_t} = k_t x + b_t. \quad (2)$$

Заметим, что $\theta_t = \theta + \tau_t$, при этом $\operatorname{tg} \theta_t = k_t$ – тангенс угла наклона прямой, которая определяет текущее целевое направление в момент времени t . Определим величину изменения τ_t . Положим $x_t = x_0 + \alpha_t$, $y_t = y_0 + \beta_t$, где α_t, β_t – приращения соответствующих координат к моменту времени t .

$$k_0 = \frac{y^* - y_0}{x^* - x_0} = \frac{\gamma}{\chi} = \operatorname{tg} \theta, \quad (3)$$

где θ – целевой угол.

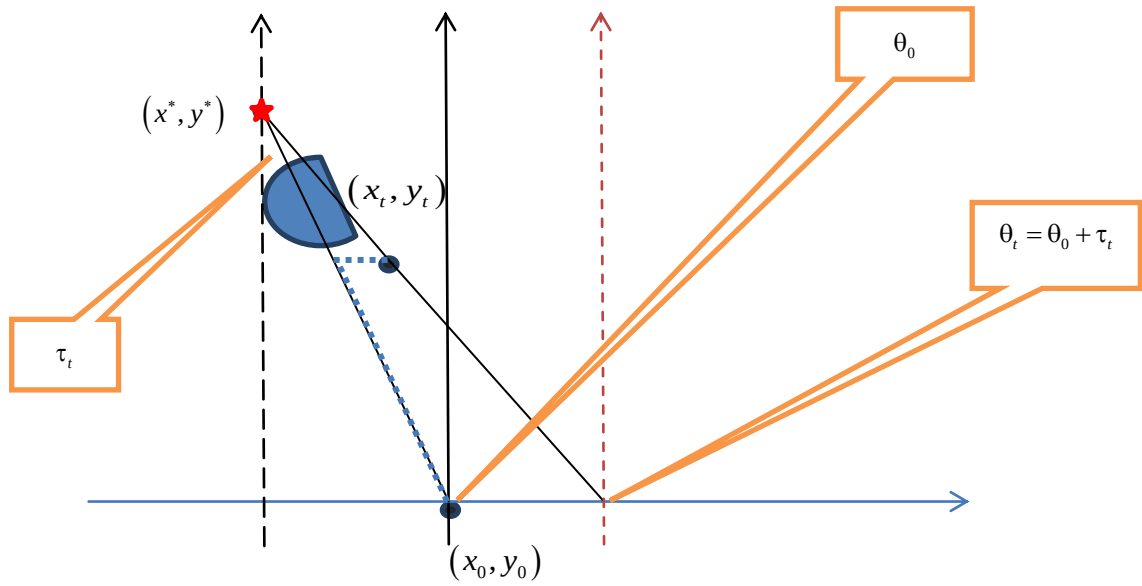


Рис. 2. Перемещение робота из точки (x_0, y_0) в точку (x_t, y_t)

$$k_t = \frac{y^* - y_t}{x^* - x_t} = \frac{y^* - y_0 - \beta_t}{x^* - x_t - \alpha_t} = \frac{\gamma - \beta_t}{\chi - \alpha_t}. \quad (4)$$

Вычислим

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{k_t - k_0}{1 + k_t k_0} = \frac{\alpha_t \operatorname{tg} \theta - \beta_t}{\operatorname{tg} \theta (\gamma - \beta_t) + (\chi - \alpha_t)}, \quad (5)$$

где α_t, β_t – изменения координат при перемещении из начальной точки (x_0, y_0) в текущую точку (x_t, y_t) .

3. База правил для управления объездом препятствий

Нечеткие системы управления подробно рассмотрены в [2,3,6]. Успех их практического использования во многом определяется качеством базы знаний, которая состоит из базы продукционных правил и базы данных, содержащей информацию о параметрах правил. Методы построения оптимальной базы правил, в частности, представлены в [7,8]. Рассмотрим методы формирования базы правил для управления движением робота.

Основная стратегия управления в режиме объезда препятствия заключается в том, чтобы выбрать возможное направление, которое имеет наименьший угол отклонения по отношению к целевому направлению. Таким образом, если датчики показывают, что препятствия нет, то робот движется по прямой, которая определяет текущее целевое направление. Текущее целевое направление в точке (x_t, y_t) будем называть *разрешенным*, если датчики не показывают препятствия, иначе направление назовем *запрещенным*. Если имеется препятствие, то при его объезде слева или справа текущей координатой робота становится точка (x_t, y_t) , при этом целевой угол θ увеличивается на

величину τ_t , тангенс которого определяется формулой (5).

Заметим, что с помощью набора нечетких продукционных правил можно изменять угол в заданном направлении, что обеспечивает робот большей гибкостью при объезде препятствия.

Прежде чем приступить к проектированию нечеткой системы управления для объезда препятствия, необходимо определить входные и выходные переменные. Будем считать, что термы лингвистических переменных определяются в форме нечетких трапециевидных чисел $\mu_{term} = (a, b, l, r)$, где $[a, b]$ – промежуток, на котором функция принадлежности равна 1, $l(r)$ – левый (правый) коэффициенты неопределенности.

Для регистрации возникновения препятствия введем лингвистическую переменную $Dist = \text{расстояние}$, которой соответствует шкала $Term(Dist) = \{\alpha_1 = \text{малое}, \alpha_2 = \text{среднее}, \alpha_3 = \text{большое}\}$, причем каждый терм определим в виде трапециевидного нечеткого числа следующим образом:

$$\mu_{\text{малое}} = (0, 20, 0, 20),$$

$$\mu_{\text{среднее}} = (40, 60, 20, 20),$$

$$\mu_{\text{большое}} = (80, 100, 20, 0).$$

Заметим, что при возникновении препятствия необходима дополнительная информация об окружающей среде для безопасного объезда. Введем еще одну лингвистическую переменную $DirectMotion = \text{положение препятствия}$, которая указывает, в каком направлении от оси робота располагается препятствие. Данной переменной поставим в соответствие следующее множество значений $Set(DirectMotion) = \{\alpha_1 = \text{слева}, \alpha_2 = \text{впереди}, \alpha_3 = \text{справа}\}$.

Таким образом, мобильный робот способен определять расстояние до препятствия и определять положение препятствия относительно его оси. Следовательно, для объезда необходимо осуществлять движение в направлении, противоположном направлению препятствия. Поэтому в качестве выходной переменной будем

рассматривать переменную $DirectSteer = \text{рулевое направление}$, которая принимает значения из множества $Set(DirectSteer) = \{\alpha_1 = \text{влево}, \alpha_2 = \text{вперёд}, \alpha_3 = \text{вправо}\}$.

Соответствие между введенными входными и выходной переменными представлено в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие между входными переменными и переменной *рулевое направление*

<i>DirectSteer</i>	<i>Dist</i> = малое	<i>Dist</i> = среднее	<i>Dist</i> = большое
<i>DirectMotion</i> = справа	влево	влево	вперед
<i>DirectMotion</i> = впереди	вправо	вправо	вперед
<i>DirectMotion</i> = слева	вправо	вправо	вперед

Для определения величины угла, на которую следует повернуть в выбранном направлении, вводится лингвистическая переменная $AngleRotation = \text{угол поворота}$, принимающая значения в шкале $Term(AngleRotation) = \{\alpha_1 = \text{малый}, \alpha_2 = \text{средний}, \alpha_3 = \text{большой}\}$, причем каждому терму соответствует трапецевидное число, определенное на универсальном множестве

$U = [0, 45]$. Соответствующие термам трапецевидные числа имеют следующий вид:

$$\mu_{\text{малый}} = (0, 15, 0, 20),$$

$$\mu_{\text{средний}} = (20, 30, 5, 5),$$

$$\mu_{\text{большой}} = (35, 45, 5, 0).$$

Соответствие между входными переменными и переменной *угол поворота* представлено в табл. 2.

Таблица 2

Соответствие между входными переменными и переменной *угол поворота*

<i>DirectSteer</i>	<i>Dist</i> = малое	<i>Dist</i> = среднее	<i>Dist</i> = большое
<i>DirectMotion</i> = справа	большой	средний	малый
<i>DirectMotion</i> = впереди	большой	средний	малый
<i>DirectMotion</i> = слева	большой	средний	малый

На основе таблиц 1 и 2 построена база правил для нечёткого контроллера рулевого управления, включающая следующие продукционные правила:

1) если расстояние = большое и положение препятствия = справа, то рулевое направление = вперёд и угол поворота = малый;

2) если расстояние = большое и положение препятствия = впереди, то рулевое направление = вперёд и угол поворота = малый;

3) если расстояние = большое и положение препятствия = слева, то рулевое направление = вперёд и угол поворота = малый;

4) если расстояние = среднее и положение препятствия = справа, то рулевое направление = влево и угол поворота = средний;

5) если расстояние = среднее и положение препятствия = впереди, то рулевое направление = вправо и угол поворота = средний;

6) если расстояние = среднее и положение препятствия = слева, то рулевое направление = вправо и угол поворота = средний;

7) если расстояние = малое и положение препятствия = справа, то рулевое направление = влево и угол поворота = большой;

8) если расстояние = малое и положение препятствия = впереди, то рулевое направление = вправо и угол поворота = большой;

9) если расстояние = малое и положение препятствия = слева, то рулевое направление = вправо и угол поворота = большой.

Особенностью приведенной базы правил является то, что в ней комбинируются значения лингвистических и символьных переменных, что отражается на механизме логического вывода [3]. База правил удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к ней на этапе проектирования нечетких систем управления [9].

Заключение

Нечеткие системы находят все более широкое приложение в практических задачах, позволяя использовать для моделирования приближенную информацию. Большое значение для успешного решения задачи играет качество базы правил. В случае задачи управления она формируется на основе правил рационального поведения робота.

Литература

1. Юревич, И.Е. Основы робототехники [Текст]: учеб. пособие для вузов / И.Е. Юревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
2. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление [Текст] / А. Пегат. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
3. Леденева, Т.М. Особенности проектирования систем нечеткого логического вывода [Текст] / Т.М. Леденева, Д.С. Татаркин // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2006. – № 2. – С. 110-118.
4. Dorst, L. Optimal path planning by cost wave propagation in metric configuration space [Text] / L. Dorst, K. Travato // Mobile Robots. – 1988. – Vol. 1007. – № 3. – P. 186-197.
5. Payton, D.W. Plan guided reaction [Text] / D.W. Payton, J.K. Rosenblatt, D.M. Keirsey // IEEE Trans. Syst. Man Cyber. – 1990. – Vol. 20. – № 6. – P. 1370-1382.
6. Леденева, Т.М. Исследование систем нечеткого логического вывода / Т.М. Леденева, Д.С. Татаркин // Информационные технологии. – 2007. – № 7. – С. 12-19.
7. Ledeneva, T.M. Optimal Design of Fuzzy Rule Base [Text] / / T.M. Ledeneva, M.A. Sergienko // Automation and Remote Control. – 2012. – Vol. 73. – № 11. – P. 1944-1949.
8. Леденева, Т.М. Формирование оптимальной базы нечетких правил [Текст] / Т.М. Леденева, М.А. Сергиенко // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2008. – Т. 3. – № 1. – С. 57-70.
9. Леденева, Т.М. О проблеме обеспечения некоторых требований к базе знаний в нечетких системах [Текст] / Т.М. Леденева, С.А. Моисеев // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2012. – № 1. – С. 149-156.
10. Podvalny, S.L. Intelligent Modelling Systems: Design Principles [Text] / S.L. Podvalny, T.M. Ledeneva // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 73. – № 7. – P. 2001-2010.

Воронежский государственный технический университет

THE BASE OF RULES OF FUZZY CONTROL SYSTEM MOBILE ROBOT MOTION

T.M. Ledeneva, V.V. Kashko

The article presents the results of a fuzzy control system, which ensures the movement of the mobile robot to the goal that avoids obstacles

Key words: mobile robot, fuzzy control system, the base of production rules

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО МОДУЛЯ ОБМЕНА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ ДЛЯ 1С:PDM

В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, Н.И. Гребенникова, С.А. Коваленко

В статье рассмотрены подходы по организации информационного взаимодействия между PDM-системой и САПР ТП

Ключевые слова: технологическое проектирование, 1С:PDM, САПР ТП, информационное взаимодействие

Система управления инженерными данными 1С:PDM, разработанная компанией APPIUS, реализована на платформе 1С:Предприятие и имеет модульную структуру, которая в значительной степени определяет функциональность системы. Основными модулями системы являются модуль управления справочной информацией, модуль управления структурой изделия и модуль управления технологией изготовления. Помимо этого в состав системы включен ряд второстепенных модулей: управление изменениями, управление архивом, нормирование (рис.1).

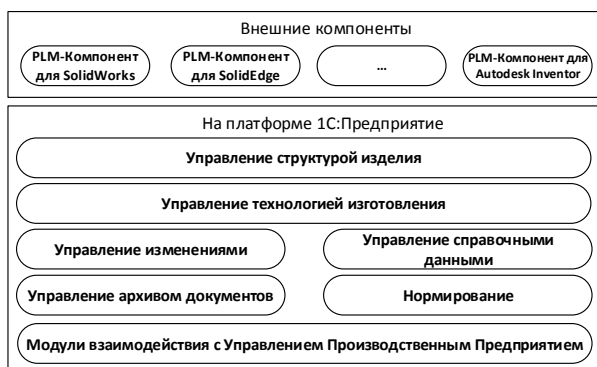


Рис. 1. Структура 1С:PDM

Основной концепцией системы является максимально полная интеграция всех данных об изделии вокруг электронной структуры изделия (ЭСИ), которая может быть сформирована автоматически на базе 3D-модели с использованием соответствующей PLM-компоненты, реализующей обмен данными между 1С:PDM и системой трехмерного моделирования.

В качестве системы трехмерного моделирования можно использовать SolidWorks, SolidEdge, AutoCAD, Autodesk Inventor, КОМПАС.

1С:PDM предоставляет возможности как для структурированного хранения информации в

структуре метаданных системы, так и для хранения файлов любых форматов, имеющих отношение к изделию [1].

Особенностью реализации конфигурации 1С:PDM от прочих конфигураций 1С:Предприятия является организация оперативных данных (электронная структура изделия, электронная технология) преимущественно средствами справочников 1С без использования документов.

Такой подход определен основным предназначением системы, которое сводится к организации сложноорганизованных иерархических структур данных и средств для их поиска. Использование же документов 1С:Предприятие оправдано в тех случаях, когда необходимо обеспечить оперативную регистрацию каких-либо событий с учетом хронологии.

Используемый подход эффективен для решения задач управления справочными данными, ведения ЭСИ и частично управления технологией, позволяющей формировать комплекты технологической документации в соответствии с ЕСТД. Однако для реализации полноценного функционала САПР ТП, обеспечивающего автоматизированное проектирование технологических процессов, выбранного инструментария, по-видимому, недостаточно.

Так, например, в системе не реализован такой характерный для САПР ТП функционал, как автоматизированная оценка и согласование на технологичность выбранных изделий, не выполняется проверка на совместимость операций и переходов, оборудования и оснастки, режущего инструмента и материала детали.

В то же время используемая в системе модель представления технологических данных является вполне пригодной для формирования описаний технологических процессов и организации эффективной работы с ними [2]. Для разработки сложных описаний технологических процессов может потребоваться механизм обмена данными, позволяющий производить загрузку и выгрузку технологической информации для обмена ею со сторонними САПР ТП [2, 3].

Наличие такого механизма позволит производить выгрузку технологических данных из 1С:PDM, загрузку и последующую обработку этой информации в сторонней САПР ТП с использованием функционала, отсутствующего в 1С: PDM, загрузку результирующих данных в 1С:PDM для организации хранения и

Барабанов Владимир Федорович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: bvf@list.ru

Нужный Александр Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: nam14@mail.ru

Гребенникова Наталия Ивановна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 243-77-18

Коваленко Сергей Александрович – ВГТУ, студент, e-mail: sergpc@yandex.ru

использования технологических данных с привязкой к ЭСИ (рис. 2).

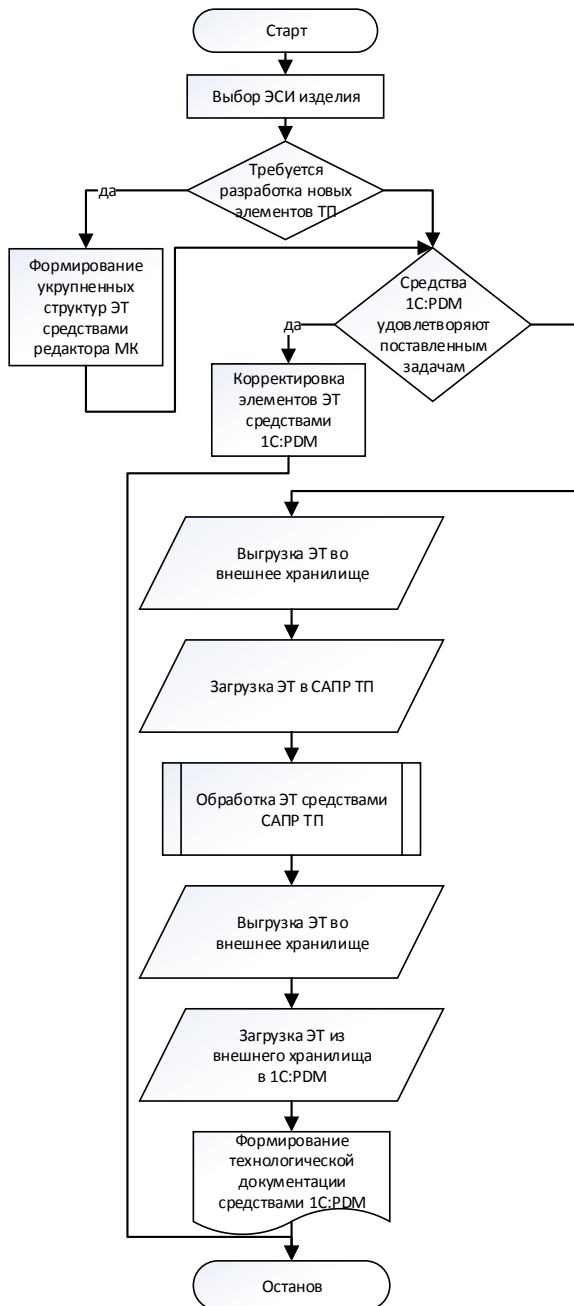


Рис. 2. Схема формирования технологических описаний

Универсальный модуль обмена технологическими данными, рассмотренный в данной статье, решает задачи выбора объектов электронной технологии (ЭТ), выгрузки их в определенном формате и загрузки данных из этого формата. Модуль реализован на языке платформы 1С:Предприятие в виде внешней обработки и интегрирован в интерфейс конфигурации 1С:PDM [4].

При разработке модуля были решены следующие задачи:

1. Определены справочники, содержащие описания ЭТ изготовления изделий, и справочные элементы, используемые для описания технологии,

для которых должна обеспечиваться миграция данных.

2. Разработаны промежуточные хранилища информации, содержащие данные в виде, удобном для хранения и преобразования из представлений справочной системы одного программного продукта в представления справочной системы другого программного продукта и наоборот.

3. Разработаны режимы синхронизации справочников и режимы обмена данными об электронной технологии (ЭТ) изделий.

Поскольку, как было сказано выше, для хранения всех данных в системе 1С:PDM используются справочники, на первом этапе был произведен анализ справочной системы конфигурации для выявления перечней справочников двух видов:

1) справочники, содержащие справочную информацию, используемую при создании описаний ЭТ изготовления изделий;

2) справочники, содержащие непосредственно описания ЭТ изготовления изделий.

Для решения этой задачи была разработана программная утилита, осуществляющая контроль изменения данных справочной системы при создании новых технологических описаний. Анализ изменения количества записей в справочниках показал, что для формирования технологических описаний в системе 1С:PDM задействовано 30 справочников из 68, имеющихся в версии конфигурации 2.8.1.19.

Для хранения конечных описаний ЭТ («Элементы технологии», «Параметры элементов технологии», «Вертикальные связи» и т.д.) было принято решение использовать формат XML, поскольку он позволяет сохранить структуру объекта. Такой подход позволяет сократить количество передаваемых данных в большинстве случаев, поскольку не все технологические описания будут передаваться одновременно.

Для обмена справочными элементами, используемыми для описания техпроцессов («Виды средств технологического оснащения», «Методы обработки», «Рабочие центры» и т.д.), было принято использовать формат Microsoft Excel, поскольку он позволяет создать наиболее близкое к исходному описанию справочных данных, что в дальнейшем значительно упрощает их обработку. Для сохранения данных каждого справочника используется отдельный файл.

В качестве основы для обмена элементами ЭТ взята процедура обмена технологической информацией от авторов конфигурации – компании APPIUS. Однако данная процедура не может быть использована для организации обмена технологическими данными с системами, отличными от 1С:PDM, поскольку формирует лишь XML-описания элементов ЭТ и не обеспечивает обмена используемой в описаниях ЭТ справочной информацией.

В модуль добавлен функционал по обмену необходимыми справочниками, а также предусмотрен выбор одного из трех вариантов

режимов обмена данными: режим замещения, режим дополнения, интерактивный режим.

Укрупненная структура модуля приведена на рис. 3.

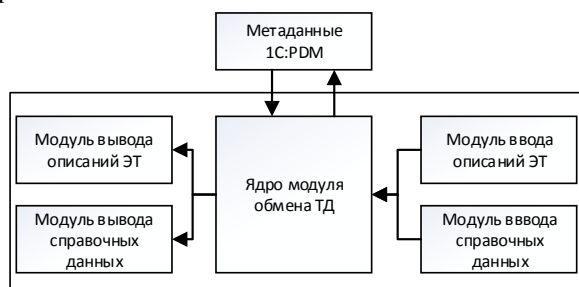


Рис. 3. Укрупнённая структура модуля обмена технологическими данными

Ядро модуля обмена содержит функции визуализации, настройки режимов и функции обработки данных. Задачами ядра является предоставление интерфейса визуализации технологических данных, возможность выбора элементов ЭТ для выгрузки, возможность настройки режимов работы остальных модулей, организация обмена данными с метаданными конфигурации. Элементы ЭТ для выбора представлены в виде дерева. Для визуализации используются стандартные решения компании APPIUS.

Модуль вывода описаний электронной технологии представляет собой набор функций, осуществляющих вывод выбранных описаний ЭТ подготовки изделий в файл. Основные элементы ЭТ хранятся в виде XDTO-объектов. В ходе работы модуля эти объекты преобразуются в XML формат и затем сохраняются в файл. Модуль способен принимать и сохранять как один, так и несколько элементов ЭТ, однако сохранение для каждого происходит в разных XML – документах.

Работа модуля вывода справочных данных осуществляется следующим образом:

1. Выбираются справочные данные, имеющие отношение к выбранным элементам ЭТ.
2. Формируется файл Excel для каждого справочника.

3. Производится выгрузка отобранных элементов справочника в файл.

Работа модулей ввода данных осуществляется аналогичным образом и может производиться в одном из трех режимов: режим замещения, режим дополнения или пользовательский режим. В режиме замещения новая информация замещает старую при совпадении ключевого поля. В режиме дополнения изменения в существующие данные не вносятся, а производится только добавление данных. В интерактивном режиме пользователь принимает решение о каждом случае обновления данных.

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. 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. Принципы построения системы интерактивного проектирования технологических процессов [Текст] / В.Ф. Барабанов, А.М. Нужный, А.Д. Поваляев, Н.И. Гребенникова, В.В. Сафронов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. – Т. 10. - № 5. - С. 64-66.
3. Концепция бесшовной интеграции управленческих систем [Текст] / В.В. Сафронов, В.Ф. Барабанов, А.Д. Поваляев, А.В. Гаганов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. – Т. 9. - № 6.1. - С. 34-40.
4. Алгоритм запуска сторонних приложений из системы 1С:PDM [Текст] / А.И. Сукачев, А.М. Нужный, А.В. Гаганов, Н.И. Гребенникова, А.В. Ачкасов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. – Т. 10. - № 5. - С. 10-13.

Воронежский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF UNIVERSAL COMMUNICATIONS MODULE TECHNOLOGICAL DATA FOR 1С:PDM

V.F. Barabanov, A.M. Nuzhnyy, N.I. Grebennikova, S.A. Kovalenko

Approaches on the organization of information exchange between PDM-system and CAD-system are considered in article

Key words: information systems, graphical interactive system, communication

РАЗРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ ТЕСТИРОВАНИЯ И ОТЛАДКИ ЦИФРОВЫХ СХЕМ

О.Ю. Мартынов, Е.Д. Алперин

В статье отражены результаты исследования: выполнено моделирование, проведено тестирование и отладка работы микроконтроллера, проведена синхронизация генератора логических последовательностей и логического анализатора, созданы текстовые файлы логических последовательностей для генератора логических последовательностей, произведено сравнение результатов моделирования с реальной работой микроконтроллера

Ключевые слова: тестирование, отладка, генератор логических последовательностей, логический анализатор, микроконтроллеры

Постановка задачи. Современные системы управления невозможно представить без систем реального времени [1], строящихся на базе микроконтроллеров (МК) и микропроцессоров (МП). Основными задачами таких систем являются контроль состояния управляемых объектов, сбор и обработка данных, формирование управляющих воздействий. Необходимость реализации сложных алгоритмов управления, использование большого количества входных аналоговых и цифровых сигналов осложняют тестирование и отладку работы микроконтроллера в процессе его разработки. Поэтому для проведения тестовых испытаний необходимо использовать специальные аппаратно-программные средства, учитывающие конструктивные особенности испытательных имитирующих и моделирующих установок, и конкретные условия проведения испытаний.

В настоящее время мировой рынок контрольно-измерительного оборудования и приборов предоставляет потребителю широкий набор современных инструментов для функционального и параметрического контроля интегральных схем. Лидеры отрасли, например, американская компания Teradyne, японская фирма Advantest и др., производят автоматические комплексы тестирования интегральных микросхем любой степени интеграции, обеспечивают контроль функционирования и электрических параметров кристаллов на пластинах всех размеров. Отличительными особенностями измерительной техники данных компаний является высокая скорость и точность измерений, многофункциональность, гибкость, универсальность, поддержка парал-

лельного тестирования и др. Измерительная платформа комплексов позволяет расширять и наращивать измерительные возможности, видоизменять их при появлении новых требований пользователя к контролю компонентов.

Однако наряду с неоспоримыми достоинствами у подобного контрольно-измерительного оборудования имеются существенные недостатки. Основными недостатками являются очень высокая стоимость оборудования, его большие габариты, высокий уровень шума, высокое энергопотребление, необходимость обслуживающего персонала, необходимость обеспечения доступа к специальным средам для работы. Окупаемость оборудования достигается при использовании его для производственных нужд, серийных поставок.

По указанным причинам встает вопрос о поиске альтернативных методов измерения интегральных компонентов. Основными критериями поиска являются доступность оборудования, его низкая стоимость и возможность проведения тестирования и отладки в кратчайшие сроки.

Одним из доступных способов отладки и тестирования микроконтроллеров является использование логического анализатора (ЛА), задача которого сводится к фиксации цифровых последовательностей сигналов, их визуализации и анализа, и генератора логических последовательностей (ГЛП) для контроля тестовых команд и внешних воздействий на микроконтроллер.

ЛА характеризуются частотой внутреннего и внешнего тактирования, емкостью памяти на канал, числом каналов, способами синхронизации и запуска, формой представления данных.

Для определения значений сигналов в ЛА используют компараторы, с помощью которых

выясняется, выше или ниже входной сигнал заданного порогового уровня. Если сигнал превышает порог, его уровень определяется как высокий, если ниже порога, то низкий.

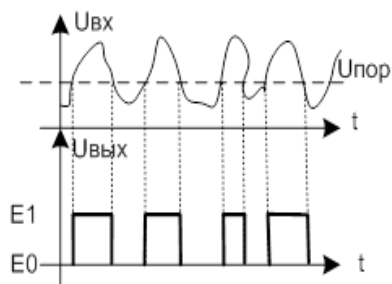


Рис. 1. Вид сигналов на входе и выходе компаратора

ЛА позволяет произвести измерения с разными методами запуска, синхронизации и обнаружения помех.

Современные анализаторы цифровых систем имеют возможность работы в синхронном и асинхронном режимах. Асинхронный режим позволяет отследить временные сдвиги сигналов, а также ликвидирует задержки в линии передачи тактирующего сигнала. Как следствие, ЛА позволяет произвести измерения и отладку цифровых систем с высокой частотой измерений. При использовании синхронного режима работы возможна синхронизация генератора и анализатора для дальнейшего сравнения листингов моделирования и реального тестирования микроконтроллера.

ГЛП имеют различные варианты синхронизации (внешним и внутренним тактовым сигналом), передачи сигналов (по событиям, сигналам, времени), а также возможности временного сдвига сигналов на каналах относительно друг друга.

Проблемы, возникающие при тестировании МК с помощью ЛА и ГЛП. Современные микроконтроллеры являются высокоскоростными сложными устройствами, таким образом, это приводит к сложности их тестирования и измерения их ключевых параметров. Поэтому необходимо выделить проблемы, которые могут возникнуть при тестировании МК, и описать возможные методы их решения.

Несогласованность логического анализатора и генератора логических последовательностей приводит к возникновению временных задержек по линиям передачи. Это может привести к разности результатов реальной работы контроллера и моделирования.

При использовании в микроконтроллерах и микропроцессорах квазидвухнаправленных портов возникает возможность короткого замыкания при подаче на выводы данных и одновременной выдаче данных по этим выводам. Поэтому необходимо отслеживать моменты переключения работы портов и переводить выводы измерительного комплекса в состояние высокого импеданса.

На высоких частотах время отклика микроконтроллера на входное воздействие очень мало, поэтому использование высокочастотного измерительного оборудования (частота которого в разы больше максимальной частоты микроконтроллера) позволит с высокой точностью определить событие и минимизирует возможный пропуск какого-либо сигнала. Для получения объективных результатов необходимо иметь синхронизированные во времени результаты работы микроконтроллера и его модели, чтобы была возможность сверить значения на выводах микроконтроллера и в случае ошибки видеть, в каком именно векторе произошел сбой работы, что важно для дальнейшей отладки всей системы. Отсюда возникает необходимость иметь специальное программное обеспечение для данных операций.

Проведение тестирования и отладки микроконтроллера с помощью ЛА. В данной статье было проведено исследование возможности и точности тестирования микроконтроллера 1874BE7T [1] производства ОАО «НИИ-ЭТ» (на базе Intel MCS-96) при помощи оборудования фирмы Tektronix - логического анализатора TLA 7000 [2] серии и ГЛП PG3A [3], а также произведена отладка измерительных тестов.

Первоначальным этапом проведения тестирования микроконтроллера стала симуляция работы его RTL-модели, написанной на языке Verilog HDL. Для данной задачи использовалось программное обеспечение САПР Cadence. Проведенное тестирование показало правильность работы системы команд ядра микроконтроллера.

После отладки тестов и получения временных диаграмм возникает задача создания текстового файла с входными последовательностями для ГЛП и проверочного файла с зарегистрированными состояниями всех выводов микроконтроллера. Для этого была разработана блок-схема кода Verilog HDL, реализующего данную задачу (рис. 2).



Рис. 2. Блок-схема программы-скрипта

Основной функцией данной программы является фиксация состояния всех выводов RTL-модели микроконтроллера 1874BE7T с учетом направленности сигналов – если вывод работает как выход, то его состояния записываются как «H» - уровень логической «1» и «L» - уровень логического «0». Если вывод работает как вход, то его состояние в последовательности записывается как «1» и «0» соответственно.

Данная программа была написана и отлажена с помощью инструментов САПР Cadence на языке программирования Verilog [4], [5]. Были учтены особенности работы микроконтроллера и ГЛП, формирование и форматирование текстового документа с логическими последовательностями проведено таким образом, чтобы ГЛП воспринимал данные зна-

чения, а также переводил свои выходные линии в высокоимпедансное состояние в случае работы вывода микроконтроллера на выход. Для выполнения данной задачи использовались функциональные возможности ГЛП, а именно – функция «Inhibits», позволяющая производить программный или аппаратный перевод выходов ГЛП в высокоимпедансное состояние (Z-состояние). То есть, все состояния выводов микроконтроллера 1874BE7T записывались с помощью «1» и «0», а направленность сигналов (входные или выходные) определяется с помощью дополнительной функции Inhibits. Таким образом, когда Inhibits определенного вывода был равен «1», ГЛП автоматически переводил в Z-состояние свои выходы, подключенные к выводам микроконтроллера, а микроконтроллер, в свою очередь, по соответствующим выводам производил передачу данных. Данная особенность формируемой логической последовательности позволяет программно избежать короткого замыкания на выводах измерительного оборудования.

Для предотвращения временных задержек на линии передачи была использована витая пара для подключения измерительного оборудования к микроконтроллеру, а также вводились временные задержки на каналах генератора логических последовательностей для того, чтобы получить результаты реального тестирования, аналогичные моделированию. Временные задержки позволяют сдвигать логические последовательности в диапазоне от нескольких наносекунд до сотен наносекунд, в зависимости от частоты входного тактового сигнала микроконтроллера.

	WR, RD, P2 [5]	RST	IN_SYGN	P4	P3	Inhibits	Strobe
Vector	Binary	Hex	Binary	Binary	Binary	Binary	Hex
58957	ZZZZZZZZ	01	00010111	00100001	10111010	0000000011110001	0
58958	ZZZZZZZZ	01	01010111	11111101	11001101	0000000011110001	1
58959	ZZZZZZZZ	01	00010111	11111101	11001101	0000000011110001	0

Рис. 3. Логические последовательности ГЛП с учетом функции «Inhibits» (Z – высокоимпедансное состояние выводов)

На рис. 3 показан фрагмент логической последовательности векторов для ГЛП. Слева указывается порядковый номер вектора, затем по столбцам – состояния определенных выводов микроконтроллера (задаются только входы или квазидвухнаправленные порты). В данной таблице «1» обозначает высокий уровень сигнала – 2,5 В (при напряжении питания микроконтроллера 1874BE7T 3,3 В), «0» - низкий

уровень сигнала – 1,5 В. «Z» говорит о том, что вывод ГЛП находится в высокоимпедансном состоянии, а соответствующий вывод микроконтроллера работает как выход.

Следует учесть, что ГЛП используется для формирования внешнего тактового сигнала для микроконтроллера 1874BE7T, то есть необходимо частоту формирования последовательностей увеличивать в 2 раза по сравнению

с внешней тактовой частотой, используемой при моделировании работы микроконтроллера.

Таким образом, создается система микроконтроллера и ГЛП, в которой ГЛП играет роль внешней памяти и внешних воздействий и сигналов (например, тактового сигнала и сигнала сброса), а ввод задержек генератором логических последовательностей и использование витой пары приводят к достижению результатов работы контроллера, аналогичных симуляции его RTL-модели. Доказательство данного факта являлось следующим этапом данной работы.

Контроль состояния выводов микроконтроллера осуществлялся с помощью логического анализатора TLA 7000 фирмы Tektronix. При подаче последовательности сигналов на входы микроконтроллера происходит определенный отклик на воздействия. Логический анализатор с частотой до 1,4 ГГц в асинхронном режиме и с частотой до 300 МГц в синхронном режиме [6] (частота ГЛП) производит сравнение входных и выходных сигналов микроконтроллера с помощью внутренних компараторов. Результатом является схематичное отображение входных и выходных воздействий микроконтроллера и текстовый файл с временными последовательностями работы микроконтроллера.

В синхронном режиме работы ЛА и ГЛП возможно сравнение текстовых файлов с временными последовательностями, полученных при симуляции RTL-модели микроконтроллера и полученных при тестировании с помощью ЛА и ГЛП. Для сравнения этих текстовых файлов была написана программа, сравнивающая строки и столбцы текстовых файлов и при этом игнорирующая пробелы и знаки табуляции. Сравнение текстовых файлов показало, что результаты совпадают.

Заключение. Тестирование и отладка являются одними из трудоемких и ответственных стадий производственного цикла микроконтроллеров. При высокой стоимости измерительного оборудования остро встаёт вопрос

о нахождении более дешевых альтернатив при практически неурезанных функциональных возможностях. Проведенное исследование показало, что использование современных логических анализаторов и генераторов логических последовательностей позволит совершать тестирование, отладку, контроль над состояниями микроконтроллеров на высоких рабочих частотах с достаточно высокой точностью, и при этом цена логического анализатора на порядок ниже специализированных измерительных комплексов. Данный метод является абсолютно безопасным как для выводов микроконтроллера, так и для измерительного комплекса благодаря использованию программной возможности отключения выводов ГЛП, что исключает возникновение короткого замыкания.

Также результатом работы является получение программы-скрипта, которая позволяет создать текстовый файл с последовательностью логических отсчетов, соответствующих действующим значениям при работе микроконтроллера. Использование всех возможностей программы-скрипта позволяет провести сравнение результатов моделирования и реальной работы микроконтроллера, а также ввести программные задержки для полной синхронизации. Но данная программа не является универсальной, для корректной работы с другим семейством микроконтроллеров необходимо произвести незначительные доработки.

Литература

1. Микросхема интегральная 1874BE7T. Техническое описание. ОАО «НИИЭТ», 2013.
2. Семейство логических анализаторов Tektronix. Краткое руководство по эксплуатации. Tektronix, Inc, 2013.
3. PG3A. User's Manual. Tektronix, Inc, 2012.
4. Cadence Nclaunch Tutorial. Electrical and computer engineering department, university of Cyprus, 2010.
5. Verilog HDL A guide to Digital Design and Synthesis. Самир Палниткар, 1996.
6. TLA7000 Logic Analyzer [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://www.tek.com/logic-analyzer/tla7000>.

Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

DEVELOPMENT OF ALTERNATIVE METHODS OF TESTING AND DEBUGGING OF DIGITAL CIRCUITS

O.Y. Martynov, E.D. Alperin

The article presents the results of research: modeling, conducted testing and debugging of the microcontroller has synchronized oscillator coherent and logic analyzer, create a text file logical sequence generator for a logical sequence, a comparison of simulation results and the real work of the microcontroller

Key words: testing, debugging, logical sequence generator, logic analyzer, microcontrollers

СРАВНЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КАРБИД-КРЕМНИЕВЫХ MESFET И КРЕМНИЕВЫХ LDMOS МОЩНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ К ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

М.И. Черных, А.Н. Цоцорин, В.А. Кожевников

Представлены результаты моделирования воздействия гамма-излучения на электрические характеристики кремниевых LDMOS транзисторов и карбид-кремниевых MESFET транзисторов. Проведено сравнение работоспособности данных приборов в условиях гамма-облучения разной интенсивности

Ключевые слова: карбид кремния, LDMOS транзистор, MESFET, гамма-излучение

В настоящее время возрастает интерес к радиационной стойкости мощных СВЧ-транзисторов на основе карбида кремния [1, 2]. Действительно, обладая большой шириной запрещенной зоны и высокой энергией связи, карбид кремния является одним из наиболее стойких к радиационному воздействию полупроводников. Но из-за большой стоимости подложек карбида кремния и сложности в обработке этого материала цена транзисторов на основе карбида кремния высока. С другой стороны, кремниевые мощные СВЧ-транзисторы относительно дешевы, но обладают рядом фундаментальных факторов, ограничивающих их применение в условиях жестких радиационных излучений. В данной статье представлено сравнение устойчивости карбид-кремниевых MESFET и кремниевых LDMOS транзисторов к объемной генерации носителей вследствие воздействия гамма-излучения. В качестве критерия сравнения был выбран ток стока транзистора в закрытом состоянии.

Расчеты проводились в программном комплексе Sentaurus TCAD. Метод расчета учитывает следующую зависимость уровня генерации частиц вследствие гамма-излучения от напряженности электрического поля [3, 4]:

$$G_r = g_0 \cdot D \cdot Y(F),$$

где g_0 – константа для данного материала, коэффициент уровня генерации электронно-дырочных пар, D – доза гамма-излучения, $Y(F)$ – функция, зависящая от напряженности электрического поля. При этом константа g_0 для кремния выбрана равной $4,05 \cdot 10^{13}$ 1/рад·см³, для карбида кремния – $1,4 \cdot 10^{13}$ 1/рад·см³ [5, 6].

Конструкция SiC MESFET транзистора схематично представлена на рис. 1. N⁺ эпитаксиальный слой областей стока и истока имеет концентрацию легирующей примеси (азот) 10^{19} см⁻³. Канальный эпитаксиальный слой n-типа имеет толщину 0,3 мкм и легирован азотом концентрацией $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Буферный эпитаксиальный слой толщиной 3 мкм легирован алюминием с концентрацией $8 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Длина

затвора составляет 1,5 мкм, ширина – 1 мм. При этом напряжение отсечки полученного транзистора равно 11 вольт.



Рис. 1. Схематичное изображение конструкции MESFET SiC-транзистора

Конструкция кремниевого LDMOS транзистора схематично приведена на рис. 2. Поверхностная концентрация примеси в канале транзистора $9 \cdot 10^{17}$ см⁻³. LDD область имеет поверхностную концентрацию примеси 10^{17} см⁻³. Подложка легирована до уровня $5 \cdot 10^{20}$ см⁻³, а эпитаксиальный слой до уровня $7 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Затвор имеет длину 0,4 мкм, ширину 1 мм. Пороговое напряжение транзистора равно 2 вольта.

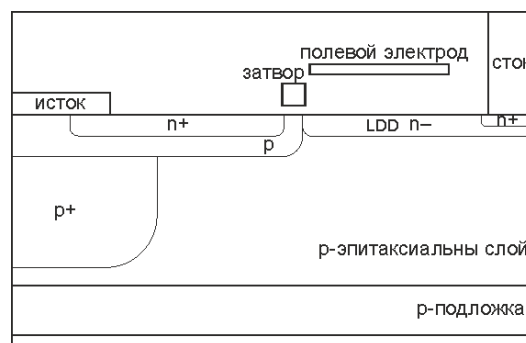


Рис. 2. Схематичное изображение конструкции LDMOS Si-транзистора

Ток стока в закрытом состоянии транзистора определялся для LDMOS транзистора при нулевом смещении на затворе, для MESFET транзистора при смещении -15 вольт. Напряжение питания обоих типов транзисторов составляет 50 вольт. Моделирование облучения транзисторов проводилось при различных дозах гамма-излучения от 0 до 10^{10} рад. Вольт-амперные характеристики транзисторов в закрытом состоянии приведены на рис. 3.

Черных Максим Игоревич - НИИЭТ, аспирант, e-mail: che@niiet.ru

Цоцорин Андрей Николаевич - НИИЭТ, канд. физ.-мат. наук, e-mail: tsotsorin@niiet.ru

Кожевников Владимир Андреевич - НИИЭТ, канд. техн. наук, e-mail: vak@niiet.ru

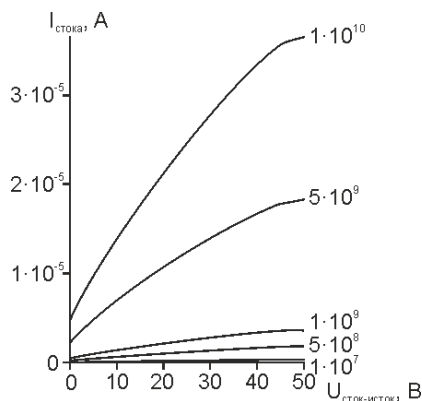


Рис. 3. а) Токи утечки стока MESFET SiC-транзистора при различных дозах гамма-излучения

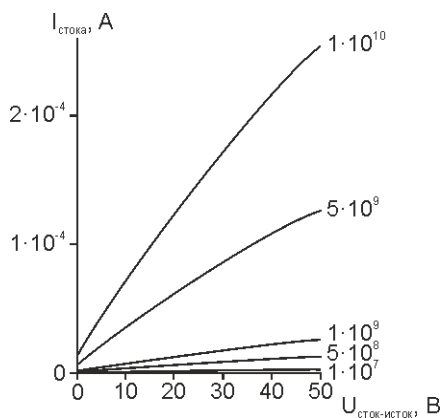


Рис. 3. б) Токи утечки стока LDMOS Si-транзистора при различных дозах гамма-излучения

В рассматриваемой конструкции MESFET SiC-транзистора в качестве затвора используется диод Шоттки. Вследствие этого при обратном запирающем напряжении через затвор Шоттки возможно протекание дырочного тока. Так как при генерации носителей вследствие гамма-излучения образуется электронно-дырочная пара, в MESFET транзисторе при отрицательном запирающем напряжении между затвором и стоком и напряжении питания между стоком и истоком образовавшиеся электроны будут двигаться к стоку транзистора, а дырки к электроду с наибольшим отрицательным смещением относительно заземлённого истока, то есть к затвору. Таким образом, при гамма-излучении через отрицательно смещенный затвор MESFET транзистора будет протекать ток, сравнимый с током утечки стока (рис. 4 а). LDMOS транзистор будет лишен такого эффекта (рис. 4 б). Поскольку затвор LDMOS транзистора изолирован от канальной области тонким диэлектриком, в котором утечки по затвору близки к нулю. При облучении LDMOS транзистора гамма-частицами в подзатворном окисле также будет происходить генерация электронно-дырочных пар, но затворный ток будет оставаться несоизмеримо меньше тока стока.

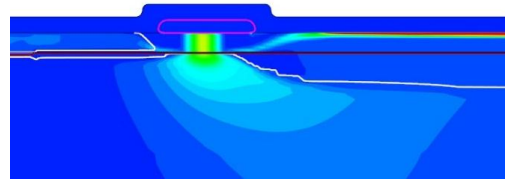


Рис. 4. а) Плотность тока, протекающего в MESFET SiC-транзисторе при воздействии гамма-излучения

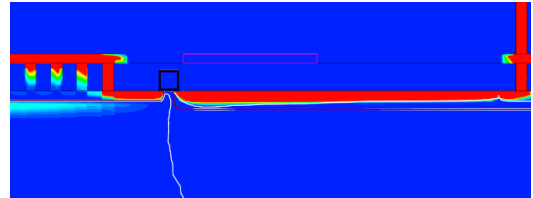


Рис. 4. б) Плотность тока, протекающего в LDMOS Si-транзисторе при воздействии гамма-излучения

Зависимость тока утечки через затвор MESFET транзистора приведена на рис. 5. Видно, что характер зависимости полностью аналогичен вольт-амперной характеристике, описывающей ток утечки стока, при этом уровень тока утечки через затвор несколько выше, чем через сток транзистора. Этот эффект объясняется конструктивными особенностями MESFET SiC-транзистора. Область n-канала транзистора имеет намного меньший объем, чем p-область буферного слоя. Так как в модели предполагается равномерная объемная радиационная генерация носителей во всех областях с высокой напряжённостью поля, то в буферной области также будут генерироваться электронно-дырочные пары. При этом электроны, сгенерированные в буферном слое, будут рекомбинировать с дырками легирующей примеси. В свою очередь, дырки, сгенерированные в буферном слое, будут протекать через обеднённую подзатворную область канала транзистора. Кроме того, радиационная генерация носителей будет выше в подзатворной области из-за большей напряженности поля. Вследствие этих причин ток утечки затвора несколько превышает ток утечки стока.

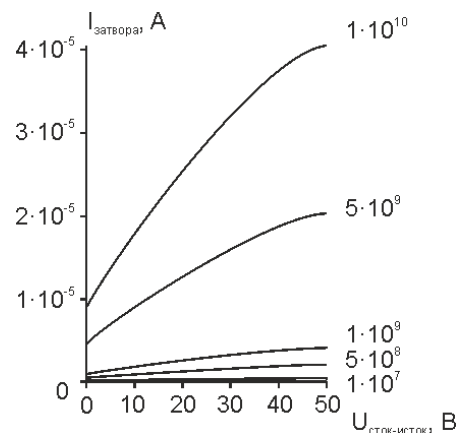


Рис. 5. Ток утечки затвора MESFET SiC-транзистора при различных уровнях гамма-излучения

На рис. 6 представлена зависимость тока стока закрытых карбид-кремниевых MESFET и кремниевых LDMOS Si-транзистора от уровня гамма-излучения. Как видно, MESFET SiC-транзистор без облучения имеет утечки меньше чем LDMOS Si-транзистор. На начальном участке зависимости ток, вызванный тепловой генерацией носителей, превышает ток носителей, образовавшихся вследствие гамма-излучения. Превалирование радиационной генерации над тепловой для MESFET транзистора начинается при поглощённой дозе гамма-излучения 10^3 рад, для LDMOS транзистора – 10^4 рад. На дальнейшем участке зависимости токи утечки LDMOS транзистора в 4,3 раза превышают токи утечки MESFET транзистора.

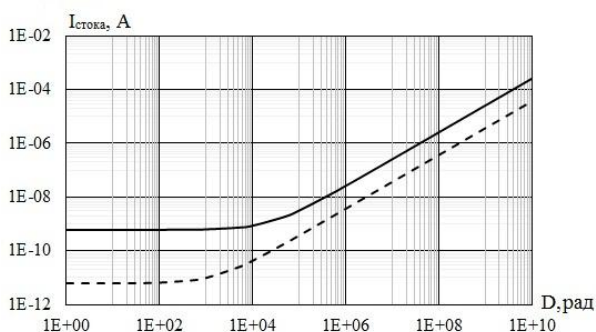


Рис. 6. Зависимость токов утечки структур от дозы гамма-излучения. Сплошная линия – LDMOS Si-транзистор, пунктирная – SiC MESFET

Таким образом, видно, что из-за конструктивных различий транзисторов соотношение токов утечки превышает соотношение коэффициентов генерации g_0 для карбида кремния и кремния, использовавшихся для расчета уровня объемной генерации электронно-дырочных пар при гамма-излучении.

Выводы

Токи утечки при воздействии гамма-излучения кремниевых LDMOS транзистора превышают более чем в 4 раза токи утечки карбид-кремниевых MESFET транзистора, что указывает на более высокую стойкость последнего к воздействию гамма-излучения. Кроме того, приведенный расчет выполнен для структур с шириной затвора 1 миллиметр. Если учесть большие плотности мощности на карбид-кремниевых приборах по сравнению с кремниевыми (~2-3 раза), то для приборов с одинаковой мощностью уровень утечек карбид-кремниевых приборов станет еще меньше уровня утечек кремниевых транзистора из-за уменьшения размеров активной области по сравнению с кремниевым LDMOS транзистором.

Литература

1. Радиационная стойкость широкозонных полупроводников на примере карбида кремния [Текст] / А.А. Лебедев, В.В. Козловский, Н.Б. Сорокин и др. // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36. – Вып. 11. С. 1354-1359.
2. Yoshikawa M. Effects of Gamma-ray Irradiation and Thermal Annealing on Electrical Characteristics of SiC MOSFETs Ohshima [Text] / M. Yoshikawa, H. Itoh // Inst. Phys. Conf. Ser. – 1996. – Vol. 142. – P. 801-804.
3. Leray, J.-L. Total Dose Effects: Modeling for Present and Future [Text] / J.-L. Leray // IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC) Short Course. - 1999. - 237 p.
4. Messenger, G.C. The Effects of Radiation on Sentaurus Device User Guide Version I-2013.12, 2013.
5. Messenger, G.C. Electronic Systems [Text] / G.C. Messenger, M.S. Ash. - 2nd edition // Van Nostrand Reinhold, NY. - 1992.
6. Radiation Effects – From Particles to Payloads [Text]: Short Course Notebook // Todd Weatherford and others. – Arizona, 2002. - 317 p.

Научно-исследовательский институт электронной техники, г. Воронеж

COMPARISON OF GAMMA RADIATION DAMAGE STABILITY OF SiC MESFET AND Si LDMOS POWER RF TRANSISTORS

M.I. Chernykh, A.N. Tsotsorin, V.A. Kozhevnikov

In this paper, the results of simulation of gamma radiation influence on electrical characteristics of LDMOS transistor and SiC MESFET are presented. The gamma radiation damage stability of these devices was compared

Key words: SiC, LDMOS transistor, MESFET, gamma radiation

СПОСОБ ОЦЕНКИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ РАДИОМОНИТОРИНГА**В.М. Питолин, Е.В. Кравцов, М.Ф. Пашук, М.Д. Стадников**

В статье рассматриваются алгоритм и способ оценки помехоустойчивости систем радиомониторинга для обоснования использования комплектующих изделий и материалов с требуемыми характеристиками, а также наличия ресурсов для выполнения поисковых исследований по выбору оптимальных вариантов схмотехнического и конструктивно-технологического исполнения данных систем на ранних этапах проектирования

Ключевые слова: помехоустойчивость, проектирование, радиомониторинг

Базовой информационной составляющей современных систем радиомониторинга различного целевого назначения являются радиоэлектронные средства радиотехнического контроля, локации, связи, навигации и др. Эффективность применения таких систем существенным образом определяется процессами добытия сведений об объектах мониторинга, то есть зависит от этапов выполнения процедур поиска, обнаружения, оценки параметров, распознавания и принятия решения, реализуемых в подсистеме первичной обработки информации указанных радиоэлектронных средств [1].

Сложные условия радиоэлектронной обстановки, которые обусловлены особенностями функционирования как объектов мониторинга, так и наличием преднамеренных и непреднамеренных помех, создают повышенные требования по помехоустойчивости, предъявляемые к пространственно-распределенным системам радиомониторинга.

Источники энергии на новых физических принципах применяются в современных средствах постановки помех. Они позволяют генерировать мощные электромагнитные помехи, которые вызывают определенные нарушения работы системы, вплоть до повреждения и полного отказа отдельных элементов [2], основанные на новых механизмах поражения (электромагнитном, тепловом, плазменном). Границы существования механизмов поражения зависят от плотности потока энергии, несущей частоты и длительности излучения помехи, частоты следования импульсов, длительности облучения объекта воздействия – системы радиомониторинга, его состояния и внешних условий в момент воздействия. Так как функциональная структура элементов пространственно-

распределенных систем радиомониторинга, являясь аппаратным отображением алгоритмов реализации операций мониторинга, представляет собой совокупность взаимозависимых элементов, отказ (нарушение работоспособности) любого из них приводит к снижению эффективности применения системы в целом.

Данное обстоятельство существенно осложняет задачу проектирования средств радиомониторинга с заданными параметрами помехоустойчивости, достигаемыми, как правило, за счет применения различных форм резервирования.

Это является причиной значительного увеличения объема аппаратных затрат на реализацию таких систем в условиях эксплуатации, характерных для аппаратуры специального назначения, когда действие различных негативных факторов способствует возрастанию на несколько порядков интенсивности отказов ее функциональных элементов по сравнению с лабораторными условиями.

Существующее методическое и аппаратное обеспечение испытаний радиоэлектронной техники на помехоустойчивость к воздействию мощных электромагнитных помех не удовлетворяет потребностям практики по достоверности и информативности результатов испытаний, точности измерения характеристик излучений и приема РЭС, частотному диапазону и времени на их планирование и проведение. Кроме того, проведение таких экспериментов связано с риском повреждения входных трактов радиоприемных устройств, испытываемых РЭС. Данное противоречие между необходимостью создания помехоустойчивых систем радиомониторинга и невозможностью проведения экспериментальных испытаний требует поиска альтернативных способов оценки помехоустойчивости и разработки технологии проектирования радиоэлектронных систем с требуемыми параметрами помехоустойчивости.

Результаты проведенного анализа выявили и позволили определить цель данной статьи – изыскание способов повышения помехоустойчивости систем радиомониторинга на основе применения технологии прогнозирования отказов ее основных подсистем и элементов на ран-

Питолин Владимир Михайлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. (473) 223-80-19

Кравцов Евгений Владимирович – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, тел. 8 (908) 137-83-31, e-mail: EvgenijKravtsov@mail.ru

Пашук Михаил Федорович – ОАО «НТЦ РЭБ», первый заместитель генерального директора, e-mail: EvgenijKravtsov@mail.ru

Стадников Максим Дмитриевич – ВУНЦ ВВС «ВВА», адъюнкт, тел. 8 (920) 219-77-66, e-mail: maxstad@yandex.ru

них этапах проектирования. Научный аспект решения сформулированной задачи заключается в поиске эффективных алгоритмов и способов оценки помехоустойчивости систем радиомониторинга для обоснования требований к их подсистемам и элементам, а также создание специальных систем моделирования, позволяющих исследовать варианты схмотехнического и конструктивно-технологического исполнения данных систем на ранних этапах проектирования. Это позволит применительно к типовым задачам проектирования наиболее полно реализовать архитектуру интегрированной информационной среды и структуру проблемно-ориентированного программного обеспечения для прогнозирования помехоустойчивости систем радиомониторинга.

Текущий уровень функционирования системы радиомониторинга можно представить как некоторую композицию помехозащищенности ее подсистем, состояния которых формализуется безразмерными величинами в диапазоне (0...1), отображающими их возможности по выполнению функций по основному назначению в условиях воздействия помех:

$$L_{CPM} = L_1 \otimes L_2 \otimes \dots \otimes L_N, \quad (1)$$

где $L_1 \dots L_N$ – уровни функционирования подсистем системы радиомониторинга.

Уровень функционирования системы радиомониторинга в целом может быть рассчитан на основе зависимости

$$L_{CPM} = \frac{1}{\frac{\alpha_1}{L_1} + \frac{\alpha_2}{L_2} + \dots + \frac{\alpha_N}{L_N}}, \quad (2)$$

где $\alpha_1 \dots \alpha_N$ – коэффициенты важности подсистем, которые определяются экспертным путем. При этом должно выполняться условие нормировки:

$$\alpha_{CPM} = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N = 1. \quad (3)$$

В этом случае такое свойство системы радиомониторинга и ее подсистем, как выполнение своих функций и сохранение параметров в пределах установленных норм во время и после действия помех можно характеризовать некоторой упорядоченной совокупностью определяющих показателей $N = (n_1, n_2, \dots, n_k)$, характеризующих уровни функционирования в зависимости от состава и количественных характеристик (частота F , амплитуда A , длительность τ , период следования электромагнитных импульсов T) помех. Следовательно, каждая подсистема характеризуется множеством критичных элементов и множеством каналов проникновения помеховых сигналов. На рис. 1 в качестве примера представлен состав каналов проникновения помех и критичные элементы в типовом комплексе радиомониторинга.

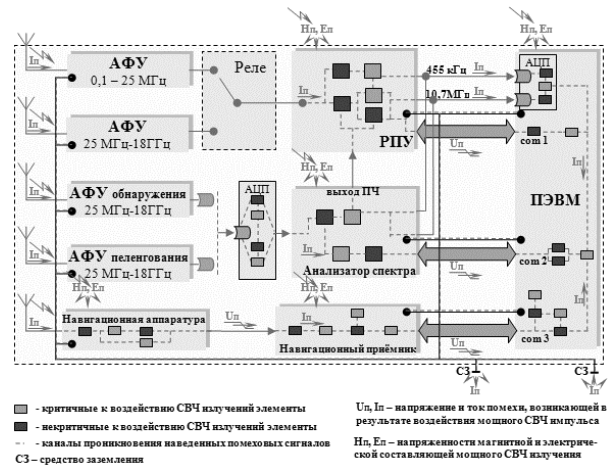


Рис. 1. Каналы проникновения помеховых сигналов, возникающих в результате воздействия мощных электромагнитных помех

Уровни функционирования подсистем системы радиомониторинга можно определить как отношение их возможностей по решению поставленных задач в помеховой обстановке к штатным возможностям:

$$L_i = L_{i \text{ шт}} \cdot \left(1 - \sum_{j=1}^N S_{\text{пор}}^j \right), \quad (4)$$

где L_i – уровень функционирования i -ой подсистемы системы радиомониторинга в условиях воздействия помех; $L_{i \text{ шт}}$ – штатный уровень функционирования i -ой подсистемы системы радиомониторинга; $S_{\text{пор}}^j$ – степень поражения j -го критичного элемента; $j=1..N$ – номера критичных элементов.

Расчеты с использованием зависимости (4) проводятся для всех подсистем системы радиомониторинга, способствующих поддержанию основной (целевой) функции в зависимости от изменения параметров помеховой обстановки. Из полученных значений уровней функционирования подсистем системы радиомониторинга выбирается минимальный. Он будет определять помехоустойчивость системы радиомониторинга в целом, то есть

$$L_{CPM} = \min \{L_1, \dots, L_N\}. \quad (5)$$

С учетом изложенного алгоритм оценки помехоустойчивости систем радиомониторинга в средствах проектирования должен включать следующие операции:

- моделирование воздействий мощных электромагнитных помех;
- формирование состава и структуры каналов проникновения помеховых сигналов и аппроксимация их проходных характеристик;
- определение реакции критичных элементов на помеховые воздействия;

- расчет показателей помехозащищенности подсистем системы радиомониторинга;
- определение помехоустойчивости системы радиомониторинга;
- формирование требований к функционально-структурным характеристикам системы радиомониторинга.

Порядок оценки помехоустойчивости систем радиомониторинга с учетом функциональной иерархии задачи, представлен на рис. 2. С его помощью можно дать точное описание алгоритмического обеспечения прогнозирования помехоустойчивости систем радиомониторинга к воздействию мощных электромагнитных помех (рис. 3).

Входными данными являются:

- последовательность входных воздействий – мощных электромагнитных помех, представленных в виде массива. Размерность массива определяется частотами дискретизации мощных электромагнитных помех $MЭМП_1, MЭМП_2, \dots, MЭМП_i$, где $MЭМП_i$ – i -ый член модели.
- состав и структура каналов проникновения помех $KPP_1, KPP_2, \dots, KPP_i$, представляемых в виде последовательности размера m , где m – количество узлов, определяемое как сумма рецепторов помехи и критичных элементов.



Рис. 2. Состав процедур оценки помехоустойчивости систем радиомониторинга

Выходными данными алгоритмического обеспечения будет последовательность $Param_1, Param_2, \dots, Param_i$, определяющая реакцию критичных элементов на помеховые сигналы и значения контролируемых параметров, превышающие допустимые значения критичных элементов.

В приведенной на рис. 2 схеме алгоритма выполняются процедуры оценки помехоустойчивости системы радиомониторинга. В первом

блоке (B_1) аппроксимируется входное воздействие. Результатом аппроксимации являются параметры мощного электромагнитного излучения. Во втором блоке (B_2) аппроксимируется состав и структура каналов проникновения помеховых сигналов. Результатом аппроксимации являются параметры канала проникновения помех. В третьем блоке (B_3) определяются реакции критичных элементов к воздействию мощных электромагнитных помех. Для этого создается обширное семейство «созидающих» функций, определяющих реакцию критичных элементов. При этом формируется список путей проникновения помеховых сигналов в виде поддеревьев. После чего упорядочиваются метки всех узлов (критичных элементов) в дереве канала проникновения помех.

В четвертом блоке (B_4) оцениваются показатели помехозащищенности для всех поддеревьев каналов проникновения помех, а полученные значения показателей в блоках B_5 и B_6 сравниваются с допусками множества контролируемых параметров. В пятом блоке (B_5) оцениваются необратимые эффекты критичных элементов, а следовательно, необратимые катастрофические отказы элементов системы радиомониторинга. В шестом блоке (B_6) оцениваются обратимые эффекты критичных элементов и обратимые и необратимые деградационные отказы подсистем системы радиомониторинга.

В случае несоответствия требованиям помехозащищенности (блок B_5) формируются требования к оптимизации состава и структуры уязвимого канала проникновения помех. Для этого в блоках B_5 и B_6 ранжируется список помехозащищенности критичных элементов для канала проникновения помех и список помехозащищенности подсистем системы радиомониторинга. Это позволяет выявить все возможные рецепторы помех и оценить помехозащищенность подсистем системы радиомониторинга. В восьмом блоке (B_8) оценивается помехоустойчивость системы радиомониторинга в целом и формируются требования к ее функционально-структурным характеристикам.

Таким образом, приведенный вариант реализации алгоритма оценки помехоустойчивости системы радиомониторинга позволяет учитывать воздействия мощных электромагнитных помех на ранних этапах проектирования.

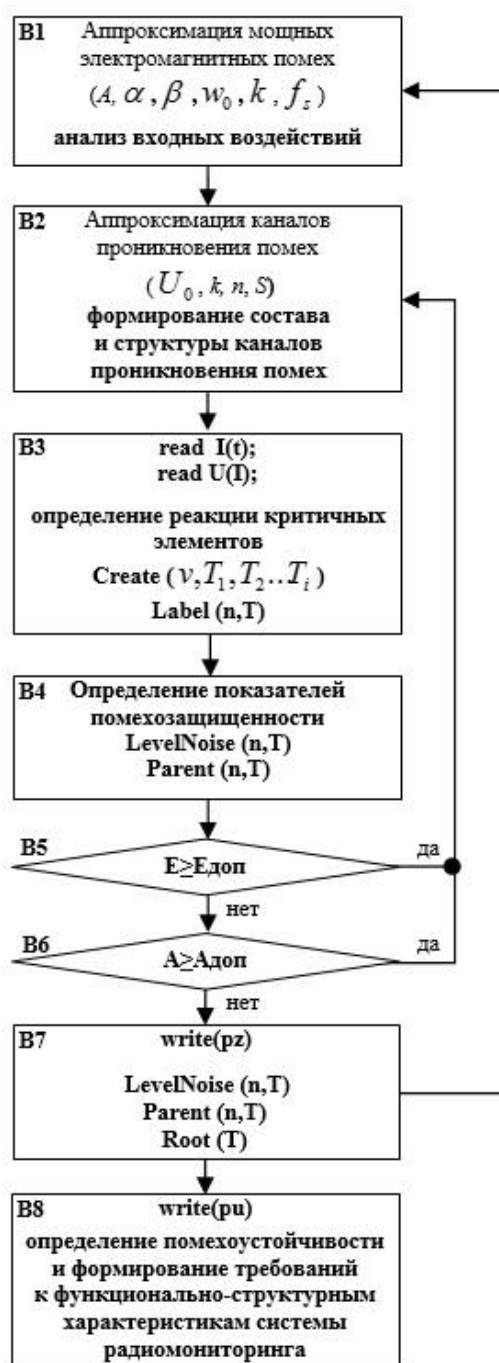


Рис. 3. Схема алгоритма оценки помехоустойчивости систем радиомониторинга в условиях воздействия мощных электромагнитных помех

Литература

1. Бененсон, Л.Д. Рассеяние электромагнитных волн антеннами [Текст] / Л.Д. Бененсон, Я.Н. Фельд // Радиотехника и электроника. - 1988. - Т. 33. - № 2. - С. 225 – 245.
2. Воскресенский, Д.И. Эффективная поверхность рассеяния остронаправленных антенн и антенных решеток. Вопросы снижения эффективной поверхности рассеяния [Текст] / Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарев, А.В. Шаталов; под ред. П.Я. Уфимцева. - М.: ИЭ РАН. - 1989. - С. 117 – 125.

3. Панычев, С.Н. Влияние характеристик рассеяния антенн на точность измерения параметров излучающих систем в ближней зоне [Текст] / С.Н. Панычев, Э.А. Соломин // Измерительная техника. - 1995. - № 5. - С. 56 – 58.

4. Гладышев, А.К. Влияние характеристик рассеяния антенны на показатели качества функционирования РЭС [Текст] / А.К. Гладышев, Е.Ф. Иванкин, С.Н. Панычев // Измерительная техника. - 1995. - № 2. - С. 48 – 50.

5. Еремин, В.Б. Характеристики рассеяния антенн и фазированных антенных решеток [Текст] / В.Б. Еремин, С.Н. Панычев // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 1997. - № 8. - С. 61 – 70.

6. Панычев, С.Н. Оценка влияния характеристик рассеяния антенны на энергетические параметры спутниковых систем связи [Текст] / С.Н. Панычев // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. - 2001. - № 3–4. - С. 74 – 79.

7. Панычев, С.Н. Косвенный метод определения структурной составляющей рассеяния антенны [Текст] / С.Н. Панычев, Э.А. Соломин // Радиопромышленность. - М.: НИИЭИР. - 1993. - С. 60 – 62.

8. Панычев, С.Н. Оценка влияния характеристик рассеяния измерительных антенн на точность измерения плотности потока энергии электромагнитного поля [Текст] / С.Н. Панычев, П.М. Мусабеков // Метрология. - 1998. - Т. 6. - С. 36 – 41.

9. Панычев, С.Н. Методика расчета энергетических потерь в радиолиниях, обусловленных рассеянием радиоволн на антеннах СВЧ [Текст] / С.Н. Панычев // Антенны. - 2001. - № 5(51). - С. 68 – 70.

10. Гладышев, А.К. Экспериментально-расчетная модель оценки характеристик рассеяния апертурных антенн [Текст] / А.К. Гладышев, С.Н. Панычев, Е.Ф. Иванкин // Метрология. - 1993. - № 11. - С. 24 – 28.

11. Гладышев, А.К. Оценка возможности применения измерительных антенн в качестве рабочих мер ЭПР / А.К. Гладышев, С.Н. Панычев, Е.Ф. Иванкин // Измерительная техника. - 1993. - № 2. - С. 57 – 59.

12. Ибрагимов, Н.Г. Методика и результаты эксперимента по исследованию характеристик отражения рупорной антенны в широком диапазоне частот [Текст] / Н.Г. Ибрагимов, С.Н. Панычев, В.А. Савинов. // Антенные измерения: сб. науч. трудов. Ереван: ВНИИРИ, 1990. - С. 191 – 192.

12. Кузнецов, А.А. Характеристики рассеяния линейных вибраторных решеток Ван-Атта [Текст] / А.А. Кузнецов // Журнал радиоэлектроники. - 2014. - № 5. - С. 37 – 43.

13. Формализованный подход к генерации рациональных вариантов развития системы испытаний техники радиоэлектронной борьбы [Текст] / С.Н. Панычев, Д.М. Бывших, С.В. Суровцев, Н.А. Самоцвет // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 3-1. - С. 71-75.

14. Волков, А.В. Синтез схемы дальномера-пеленгатора на основе процедур пересечения и объединения с обработкой сигнала во временной области [Текст] / А.В. Волков, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 4. - С. 12-14.

15. Оптимальный прием и обработка радиосигналов в нелинейном канале ВЧ-облучения для дистанционного снятия акустической информации [Текст] / В.Б. Авдеев, С.Н. Панычев, Н.Г. Денисенко, Н.А. Самоцвет, М.С. Сковпин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 94-98.

16. Расчетно-инструментальный метод анализа прохождения случайного процесса через нелинейную цепь

[Текст] / С.Н. Панычев, М.Ф. Пашук, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, А.Е. Ломовских // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 109-113.

17. Экспериментально-расчетный метод определения двухсигнальной избирательности цифровых радиоприемных устройств [Текст] / В.М. Питолин, С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, С.А. Акулинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - №. 6-3. - С. 45-48.

18. Питолин, В.М. Анализ методов формирования сигналов и помех с заданными законами распределения параметров [Текст] / В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, А.В. Волков // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - №. 5-1. - С. 34-36.

19. Панычев, С.Н. Алгоритм формирования имитационных помех с заданными спектральными и информационными свойствами [Текст] / С.Н. Панычев, С.В. Суровцев, С.В. Канавин // Радиолокация, навигация, связь (RLNC- 2013): труды XIX Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2013. - Т. 3. - С. 2012-2017.

20. Панычев, С.Н. Когнитивный алгоритм корреляционно-фильтровой обработки сложных сигналов на фоне гауссовых шумов [Текст] / С.Н. Панычев, С.В. Суровцев, Н.А. Самоцвет / Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2014): труды XX Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2014. - Т. 4. - С. 2000-2008.

21. Экспериментально-расчетный метод определения двухсигнальной избирательности цифровых радиоприемных устройств [Текст] / С.Н. Панычев, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, С.В. Суровцев // Интеллектуальные информационные системы: материалы ежегодной Всерос. конф. - Воронеж: ВГТУ, 2014. - С. 4-8.

22. Панычев, С.Н. Методы формирования и обработки радиопомех с учетом их статистических свойств на основе технологий векторной генерации и анализа радиосигналов [Текст] / С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, Е.А. Сытник // Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО: материалы IV науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов. - М.: ГСКБ «Алмаз-Антей», - 2013. - С. 300-306.

23. Авдеев, В.Б. Особенности современных методов моделирования приема и обработки случайных радиосигналов на фоне шумов и помех [Текст] / В.Б. Авдеев, С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж: Воронежский институт ФСИН России, 2013. - № 4. - С. 90-97.

24. Панычев, С.Н. Моделирование приема и обработки случайных радиосигналов и помех [Текст] / С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, М.С. Сковпин // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. - Воронеж: ВГТУ, - 2013. - С. 18-19.

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)

Центр системных исследований и разработок - филиал ОАО «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы» (г. Воронеж)

A METHOD OF EVALUATING NOISE IMMUNITY OF RADIO MONITORING SYSTEMS

V.M. Pitolin, E.V. Kravtsov, M.F. Pashuk, M.D. Stadnikov

In article the algorithm and a way of a noise stability assessment in systems of radio monitoring for components justification and materials with the demanded characteristics, and also existence of resources for performance of basic researches at the circuitry and constructive-technological execution choice of data systems at early design stages are considered

Key words: noiseproof, design, radio monitoring

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА СФЕРЕ, РАСПОЛОЖЕННОЙ В ДВУМЕРНО НЕОДНОРОДНОМ ПОГЛОЩАЮЩЕМ ПЛАЗМЕННОМ ОБРАЗОВАНИИ

А.Н. Косенков

Представлены результаты исследования влияния поглощающих свойств двумерно неоднородного плазменного образования на дифракцию электромагнитных волн на идеально проводящей сфере

Ключевые слова: плазменное образование, эйконал, сфера

Исследование рефракционных свойств «бесстолкновительной» непоглощающей плазмы при рассеянии электромагнитных волн на телах простой формы проводилось в [1, 2]. В настоящей работе рассматривается влияние поглощающих свойств двумерно неоднородного плазменного образования (струи) на характер рассеяния электромагнитных волн на объекте, прикрываемом таким образованием. В качестве объекта рассматривается идеально проводящая сфера.

Актуальность исследования заключается в необходимости исследования влияния процессов взаимодействия электромагнитных волн с плазменными образованиями с радиальной и угловой неоднородностью и рассеяния радиоволн на объектах, расположенных в рассматриваемых поглощающих плазменных образованиях.

Рассмотрим поглощающее плазменное образование с диэлектрической проницаемостью

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'', \quad (1)$$

где

$$\varepsilon' = 1 - \frac{N(r)}{N_{кр}} = 1 - \frac{\Phi^2 r_{кр}}{r^2}, \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{N(r)}{N_{кр}} \left(\frac{\nu_{эфф}}{\omega} \right), \quad (3)$$

$N_{кр} = \frac{\varepsilon_0 m (\omega^2 + \nu_{эфф}^2)}{e^2}$ – критическая концентрация электронов, $r_{кр}$ – продольный размер области плазменного образования с критической концентрацией электронов, ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, m – масса электрона, e – заряд электрона, ω – циклическая частота, $\nu_{эфф}$ – эффективная частота столкновений электронов, N – концентрация электронов,

$\Phi = \cos 2\theta$ – функция распределения концентрации электронов.

В дальнейшем целесообразно использовать линейные размеры в относительных единицах $r_{кр}$, т.е. $r_{отн} = \frac{r}{r_{кр}}$, при этом опуская обозначение «отн».

Будем полагать, что направление облучения остается неизменным и совпадает с осью вращения плазменного образования. Общее начало прямоугольной ($oxyz$) и сферической (r, φ, θ) систем координат выберем таким образом, чтобы они совпали с началом плазменного образования. Центр сферы смещен относительно начала координат вдоль оси z на расстояние z_0 , при этом она находится в области плазменного образования с докритической концентрацией электронов. Внешний радиус области плазменного образования обозначим a , радиус сферы – d . На рисунке показана схема облучения сферы в плазменном образовании.

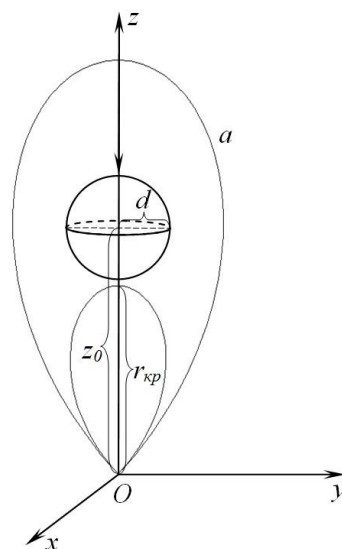


Схема облучения сферы в плазменном образовании

ном образовании. Для этого воспользуемся методом геометрической оптики, который достаточно апробирован для случая плавно неоднородных сред, в том числе для сред с поглощением.

Рассматривая далее случай слабого поглощения, можем представить облучающее поле в виде [3]

$$A = A_0 \exp \left\{ ik_0 L - \frac{k_0}{2} \int_r^a \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon}} ds \right\}, \quad (4)$$

где $ds = \frac{\sqrt{r^2 - \Phi^2}}{\sqrt{r^2 - m^2}} dr$ - элемент длины дуги луча, A и L - амплитуда и эйконал падающей волны, m - параметр разделения переменных определяется из уравнения траектории луча (9).

В результате решения дифференциального уравнения эйконала методом разделения переменных

$$\left(\frac{\partial L}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right)^2 = \varepsilon', \quad (5)$$

эйконал принимает следующий вид:

$$L = \int_0^\theta \sqrt{m^2 - \Phi^2} d\theta - m \arcsin \left(\frac{m}{r} \right) - \sqrt{r^2 - m^2}. \quad (6)$$

Решая уравнение переноса [3], амплитуду поля можно записать в виде

$$A_0 = \sqrt{\frac{1}{Dr \sin \theta} \sqrt{\frac{m^2 - \Phi^2}{r^2 - m^2}}}. \quad (7)$$

где

$$D = \frac{m^2 - \Phi^2}{m^2} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 - m^2}} + \int_0^\theta \frac{\Phi^2}{[m^2 - \Phi^2]^{3/2}} d\theta \right]. \quad (8)$$

Уравнение траектории луча, проходящего через рассматриваемую точку внутри плазменного образования, определяется как

$$\int_0^\theta \frac{m}{\sqrt{m^2 - \Phi^2}} d\theta = \arcsin \frac{m}{r}. \quad (9)$$

Общее поле рассеяния сферы в направлении на источник облучения может быть представлено в виде [2]

$$\vec{E}_{\text{от}} = \vec{e}_0 \frac{e^{ik_0 R}}{2R} \sum_q^n \left(\frac{\sqrt{\varepsilon} A^2 G}{\sqrt{|\Delta|}} \right) \exp \left[2ik_0 L + i \frac{\pi}{2} \delta \right], \quad (10)$$

где G - дискриминант первой квадратичной формы поверхности,

$$\Delta = \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho^2} \right) \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \varphi^2} \right) - \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho \partial \varphi} \right)^2 - \text{гесссиан},$$

$$\delta = \text{sign} \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \rho^2} \right), \text{ если } \Delta > 0 \text{ и } \delta = 0, \text{ если } \Delta < 0.$$

Следует отметить, что «блестящая» точка, в которой $\Delta > 0$, соответствует эллиптической стационарной точке, т.е. точке 1 рода, а «блестящая» точка, в которой $\Delta < 0$ - гиперболической («седловой») точке, или точке 2 рода, при этом фаза волны, отраженной от каждой из них, различна.

На поверхности сферы возникает одна «блестящая» точка 1 рода, и в результате преобразования получаем выражение для величины эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) идеально проводящей сферы, помещенной в двумерно неоднородное поглощающее плазменное образование с докритической концентрацией электронов, нормированной к ЭПР сферы в однородной среде:

$$\sigma_{\text{норм}} = \frac{4\alpha}{sh^2(2\sqrt{\alpha} X) d^2} Z^2(z_0) \times \exp \left[- \frac{\nu_{\text{эфф}} \Phi^2}{c} \int_{z_0}^a \frac{\sqrt{m^2 - \Phi^2}}{r^2 \sqrt{r^2 - \Phi^2}} dr \right], \quad (11)$$

$$\text{где } Z(z_0) = \frac{1}{1 + \frac{(z_0 + d) \sqrt{\varepsilon(0)}}{\sqrt{\alpha}} \text{th}(\sqrt{\alpha} X)} \text{ и } X = \arcsin \frac{1}{z_0 + d}.$$

На основе вышеприведенных выражений были проведены расчеты величины эффективной поверхности рассеяния идеально проводящей сферы, прикрытой двумерно неоднородным поглощающим плазменным образованием с докритической концентрацией электронов, при различных значениях смещения z_0 с учетом поглощения и без него. Расчеты проводились при условии $d = 0,5$, $k_0 d = 6,6$, $\nu_{\text{эфф}} = 10^9$. Результаты расчетов представлены в таблице.

ЭПР, дБ Смещение	Без погл.	С поглощением		
		3	4	5
1	2			
$z_0 + d = 1,3$	-9,3	-21,8	-21,8	-20,2
$z_0 + d = 1,5$	-4,8	-15,2	-15,2	-14,2
$z_0 + d = 1,7$	-1,7	-10,7	-10,7	-10,1

Следует отметить, что учет слабого поглощения осуществлялся на основе выражения, приведенного в [3]:

$$A = A_0 \exp \left\{ - \frac{k_0}{2} \int_{z_0 + d}^a \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon}} ds \right\}, \quad (12)$$

однако следует отметить, что в формуле (3.39), содержащейся на странице 33 в книге [3], до-

пущена опечатка, а именно отсутствует сомножитель $1/\sqrt{\varepsilon}$. В результате учет слабого поглощения дается в виде

$$A = A_0 \exp \left\{ -\frac{k_0}{2} \int_{z_0+d}^a \varepsilon'' ds \right\}. \quad (13)$$

Более правильно поглощение вычисляется на основе точной формулы

$$A_1 = A_0 \exp \left\{ -k_0 \int_{z_0+d}^a \chi ds \right\}, \quad (14)$$

где $\chi = \sqrt{-\frac{1-P}{2} + \sqrt{\left(\frac{1-P}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_{эфф} P}{2\omega}\right)^2}}, \quad P = \frac{N}{N_{кр}}.$

В таблице представлены результаты расчетов ЭПР сферы. В столбце № 2 указана ЭПР без учета поглощения, в столбце № 3 – с учетом поглощения по формуле (12), в столбце № 4 – по (14), в столбце № 5 – на основе выражения (13).

Анализ таблицы показывает, что различия между значениями, определенными на основе формул (12) и (14), отсутствуют, а между значениями, определенными в соответствии с (13) и (12), (14), имеются незначительные различия. Исходя из этого, величину поглощения электромагнитных волн в двумерно неоднородном плазменном образовании возможно определять по упрощенной формуле (13) с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Кроме того, из анализа значений ЭПР сферы, представленных в таблице, следует, что при отсутствии поглощения (столбец 2) величина ЭПР металлической сферы уменьшается по ме-

ре погружения ее ближе к области с критической концентрацией электронов ($z_0 + d \rightarrow 1$). В этом случае эффект уменьшения ЭПР сферы достигается за счет явления рефракции лучей в двумерно неоднородном плазменном образовании. При этом величина ЭПР уменьшается практически до 10 дБ. С учетом поглощения эффект уменьшения ЭПР сферы возрастает до 20 дБ.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что двумерно неоднородные плазменные образования за счет поглощения энергии электромагнитной волны в области с докритической концентрацией электронов способны уменьшать величину ЭПР идеально проводящей сферы более чем на 10 дБ, а с учетом эффекта рефракции до 20 дБ.

Выражаю благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору Ярыгину А.П. за постановку задачи и критические замечания в ходе доработки статьи.

Литература

1. Колычев, С.А. Строгое решение скалярной задачи дифракции плоской волны на протяженных двумерно-неоднородных плазменных образованиях, содержащих металлическую сферу или цилиндр [Текст] / С.А. Колычев, А.П. Ярыгин // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29, № 1. – С. 5-11.
2. Ярыгин, А.П. Диаграмма эффективной поверхности рассеяния металлического диска, расположенного в плазменном образовании с радиальной и угловой неоднородностью [Текст] / А.П. Ярыгин // Радиотехника. – 2001. – № 6. – С. 87-90.
3. Кравцов, Ю.А. Геометрическая оптика неоднородных сред [Текст] / Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов. – М.: Наука, 1980. – 304 с.

Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES BY A SPHERE LOCATED IN TWO-DIMENSIONAL ABSORBING PLASMA FORMATION

A.N. Kosenkov

The effect of absorbing properties of two-dimensional inhomogeneous plasma formation on the diffraction of electromagnetic waves by a perfectly conducting sphere

Key words: plasma formation, the eikonal, sphere

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СОГЛАСОВАНИЯ С НАГРУЗКОЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН

С.Н. Панычев, М.Ф. Пашук, Н.А. Самоцвет, А.А. Серегин, С.В. Суровцев

Приводится обоснование простой аналитико-экспериментальной модели для расчета характеристик усиления и рассеяния апертурных антенн. Показаны влияние КСВН в антенном фидере и коэффициента усиления антенны на эффективную поверхность рассеяния (ЭПР), а также взаимосвязь указанных характеристик. Приведен пример определения ЭПР рупорной измерительной антенны расчетно-экспериментальным методом на основе предложенной методики определения интегральной ЭПР антенны

Ключевые слова: ЭПР, КСВН, КУА, проектирование, антенны

Характеристики рассеяния апертурных антенн исследованы во многих работах, например, [1 - 12]. В них показано, что интегральная эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) антенны включает антенную и структурную составляющие. Структурная составляющая антенного рассеяния обусловлена в основном явлениями дифракции и рассеяния электромагнитных волн на элементах конструкции антенны. Антенная составляющая ЭПР обусловлена отражениями энергии от неоднородностей высокочастотного тракта и нагрузки. Вклад антенной составляющей в интегральную ЭПР антенны зависит от условий согласования антенны с нагрузкой и поэтому зависит от коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) в антенно-фидерном тракте на частоте облучения. На практике часто возникают ситуации, когда нужно оперативно определить ЭПР антенны за пределами ее рабочего диапазона частот. В таких случаях антенна не согласована с нагрузкой и может рассматриваться как отражатель электромагнитной энергии, имеющий две указанные выше составляющие ЭПР, причем антенная составляющая рассеяния зачастую преобладает.

В работе [13] исследовано влияние длины антенного фидера на ЭПР антенной вибраторной решетки и показано, что рассогласование входов вибраторов с фидерами приводит к повышению уровня антенной составляющей поля рассеяния, однако количественно этот эффект детально не исследован. Не исследована также взаимосвязь характеристик усиления и рассеяния антенн, обусловленная не идеальностью согласования антенны с нагрузкой, особенно при облучении антенны сигналами с частотами за пределами рабочего диапазона антенны.

Взаимосвязь характеристик усиления и рассеяния апертурных антенн

Исходя из указанного целью статьи является обоснование методического аппарата, пригодного для количественной оценки влияния КСВН на ха-

рактеристики усиления и рассеяния апертурных антенн в широкой полосе частот.

Анализ существующих аналитических моделей ЭПР апертурных антенн [1 - 13] показывает, что достаточно полно отражает характер происходящих на антенных элементах физических процессов рассеяния радиоволн модель следующего вида:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_s \left| 1 + \sqrt{\sigma_a / \sigma_s} \exp(i \cdot \Delta\phi) \right|^2, \quad (1)$$

где σ_{Σ} - интегральная ЭПР антенны, включающая структурную (σ_s) и антенную (σ_a) составляющие ЭПР;

$\Delta\phi$ - разность фаз между составляющими σ_s и σ_a , определяемая в основном электрической длиной СВЧ тракта от нагрузки до выхода антенны, положениями фазовых центров рассеяния антенной и структурной составляющих ЭПР и фазой коэффициента отражения от нагрузки Γ .

В осевом направлении излучения антенны структурная составляющая ЭПР является постоянной и не зависит от коэффициента направленного действия (КНД) антенны, тогда как антенная составляющая рассеяния связана с антенными характеристиками следующим образом:

$$\sigma_a = \eta S_{eff} |\Gamma|^2, \quad (2)$$

где η - коэффициент полезного действия (КПД) антенны;

S_{eff} - эффективная площадь антенны, связанная с КНД соотношением;

$$S_{eff} = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (\lambda - \text{длина волны излучения}).$$

В формуле (2) комплексный коэффициент отражения волн от нагрузки Γ определяется через значения коэффициента стоячей волны по напряже-

нию (КСВН): $|\Gamma| = \left| \frac{K_u - 1}{K_u + 1} \right|$, а произведение

ηS_{eff} является коэффициентом усиления антенны

(КУА): $g = \eta S_{eff}$.

Панычев Сергей Николаевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8 (915) 583-90-02

Пашук Михаил Федорович – ОАО «НТЦ РЭБ», первый заместитель генерального директора, тел. 8(916) 029-11-27
Самоцвет Николай Андреевич – ВГТУ, аспирант, тел. 8 (951) 871-87-04

Серегин Алексей Александрович – ВГТУ, аспирант, тел. 8 (915) 585-53-72

Суровцев Сергей Владимирович - ОАО «НТЦ РЭБ», начальник отдела, тел. 8 (905) 653-78-55

Коэффициент полезного действия η должен учитывать все источники потерь энергии в антенне, в том числе и за счет не идеальности согласования антенны с нагрузкой. Традиционно КПД антенны рассматривается в более узком смысле, а именно как омические потери на сопротивлении излучения. В дальнейшем будем учитывать потери и за счет несогласования антенны с полезной нагрузкой. Если приемная антенна идеально согласована с нагрузкой ($K_u = 1$), то антенная составляющая обратного рассеяния отсутствует (вся энергия поглощается в нагрузку, $\sigma_a = 0$) и суммарная ЭПР антенны в осевом направлении определяется только структурной составляющей рассеяния ($\sigma_\Sigma = \sigma_S$). Если антенна закорочена, то $|\Gamma| = 1$ и антенная составляющая рассеяния максимальна (принятая энергия излучается антенной в обратном направлении).

Если антенна согласована с нагрузкой неудовлетворительно (например, за пределами рабочей полосы частот антенны $K_u = 7 - 20$), то взаимосвязь антенной составляющей ЭПР и КУА определяется простым соотношением:

$$\sigma_a = \frac{g\lambda^2}{4\pi} \left| \frac{K_U - 1}{K_U + 1} \right|^2. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что $\frac{\lambda^2}{4\pi} |\Gamma|^2$ - это искомый коэффициент пропорциональности между характеристиками усиления (КУА g) и антенного рассеяния (составляющей ЭПР σ_a) апертурной антенны, то есть антенная σ_a составляющая ЭПР на конкретной частоте однозначно определяется значениями КУА и КСВН на этой частоте.

Известно также, что для апертурных антенн с простой геометрической конструкцией структурная составляющая ЭПР определяется формулой

$$\sigma_S = \nu G S_g, \quad (4)$$

где ν - коэффициент использования поверхности (КИП) антенны (зависит от распределения поля вдоль ее поверхности);

S_g - геометрическая площадь раскрыва антенны.

С учетом (4) окончательно интегральную ЭПР антенны простой геометрической конструкции в осевом направлении можно рассчитать по приближенной формуле:

$$\sigma_\Sigma = \sigma_S + \sigma_a = \nu G S_g + \frac{g\lambda^2}{4\pi} \left| \frac{K_U - 1}{K_U + 1} \right|^2. \quad (5)$$

Полученная простая аналитическая модель (5) может быть положена в основу простой экспериментально-расчетной методики определения ЭПР апертурных антенн в широкой полосе частот.

Экспериментально-расчетная методика определения ЭПР апертурных антенн. Измерения

ЭПР радиолокационных целей характеризуются достаточно высокой сложностью, что объясняется необходимостью применения специальных измерительных установок. Расчет ЭПР рассеивателей произвольной формы электродинамическими методами также характеризуется высокой сложностью. Однако применительно к антеннам простой геометрической конструкции определение их интегральной ЭПР может быть упрощено за счет рационального сочетания экспериментальных и расчетных методов. Предложим простую инженерную методику, позволяющую на практике решать эту задачу с приемлемой для практики точностью. Она включает следующие расчетные и измерительные процедуры.

На первом этапе рассчитывают структурную составляющую ЭПР апертурной антенны. В основу расчетов положена формула (4), причем для апертурных антенн простой конструкции КНД также рассчитывается по простым аналитическим выражениям. Так, например, для рупорной антенны (при типовом косинусоидальном распределении поля вдоль раскрыва) ее КНД определяется через геометрическую площадь раскрыва по формуле

$$G = 0,81 \frac{4\pi S_g}{\lambda^2}. \quad (6)$$

КНД оптимальных и конических рупоров можно рассчитывать также по формуле

$$G = \frac{\pi}{32} \left(\frac{\lambda}{a_r} G_E \right) \left(\frac{\lambda}{b_r} G_H \right), \quad (7)$$

где a_r, b_r - линейные размеры раскрыва рупора;

G_E, G_H - КНД антенного раскрыва в плоскостях E и H, соответственно.

На втором этапе определяют антенную составляющую рассеяния. При этом с целью повышения достоверности оценки искомого параметра целесообразно сочетать расчетный и экспериментальный методы определения этой составляющей ЭПР. Измерениям подлежит КСВН в антенном фидере. Измерения КСВН в антенном тракте характеризуются относительной простотой аппаратного и методического обеспечения и заключаются в снятии показаний измеренных значений КСВ с прибора - измерителя КСВН. Этот вид измерений легко автоматизируется. В основу расчетной модели определения антенной составляющей рассеяния в данной методике могут быть положены формулы (2) или (3), в которые подставляют результат измерения КСВН.

На третьем этапе рассчитывают интегральную ЭПР антенны по формуле (1).

В качестве практической иллюстрации возможности применения предложенного методического подхода на рис. 1 показано семейство зависимостей антенной составляющей рассеяния рупорной измерительной антенны П6-23М от ее КУА в широком диапазоне частот (1 - 12 ГГц), а также от КСВН в высокочастотном тракте между выходом антенны и входом приемного устройства. Указанные зависимости рассчитывались по формулам (2) и (3) с учетом (6). Исходные данные для расчетов брались из штатного калибровочного графика антенны, который приведен на рис. 2. В нем приведены снятые экспериментально зависимости эффективной площади антенны и КУА от частоты.

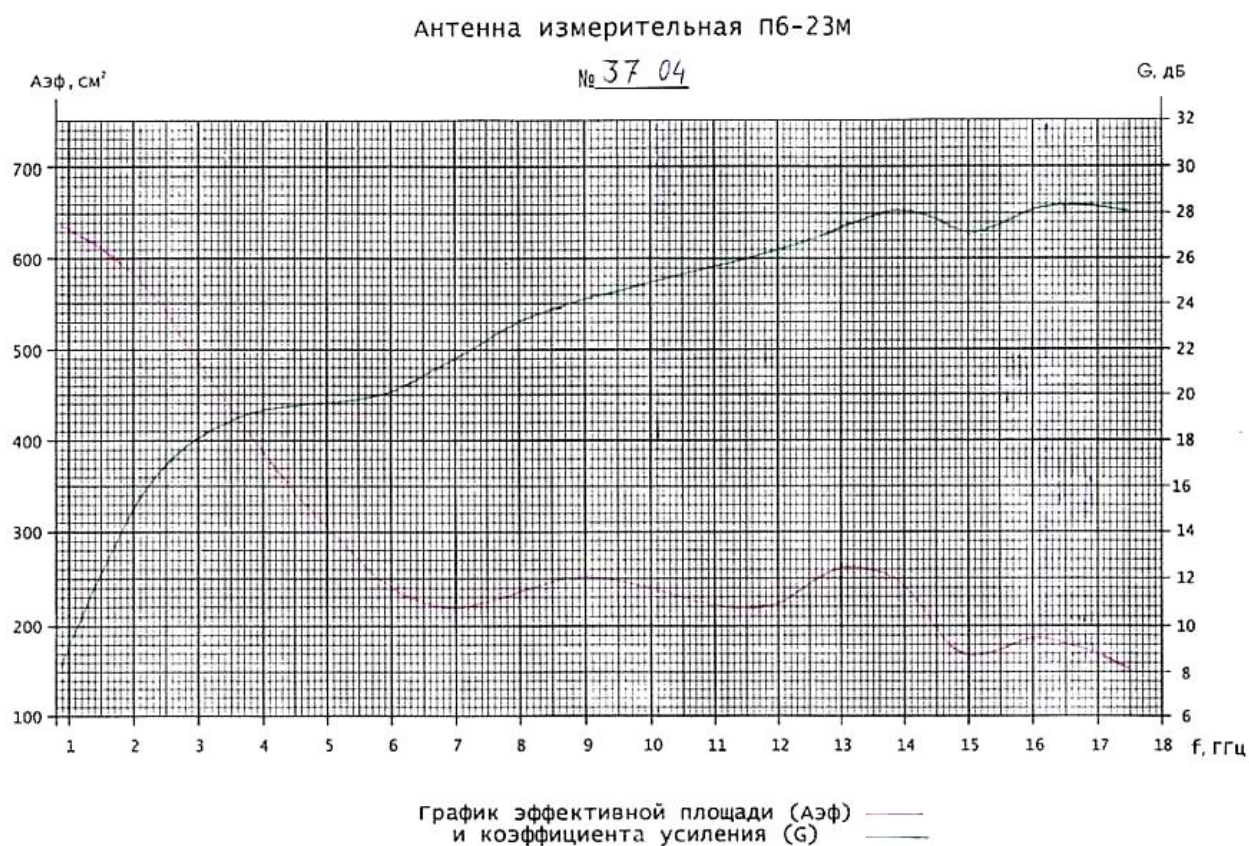
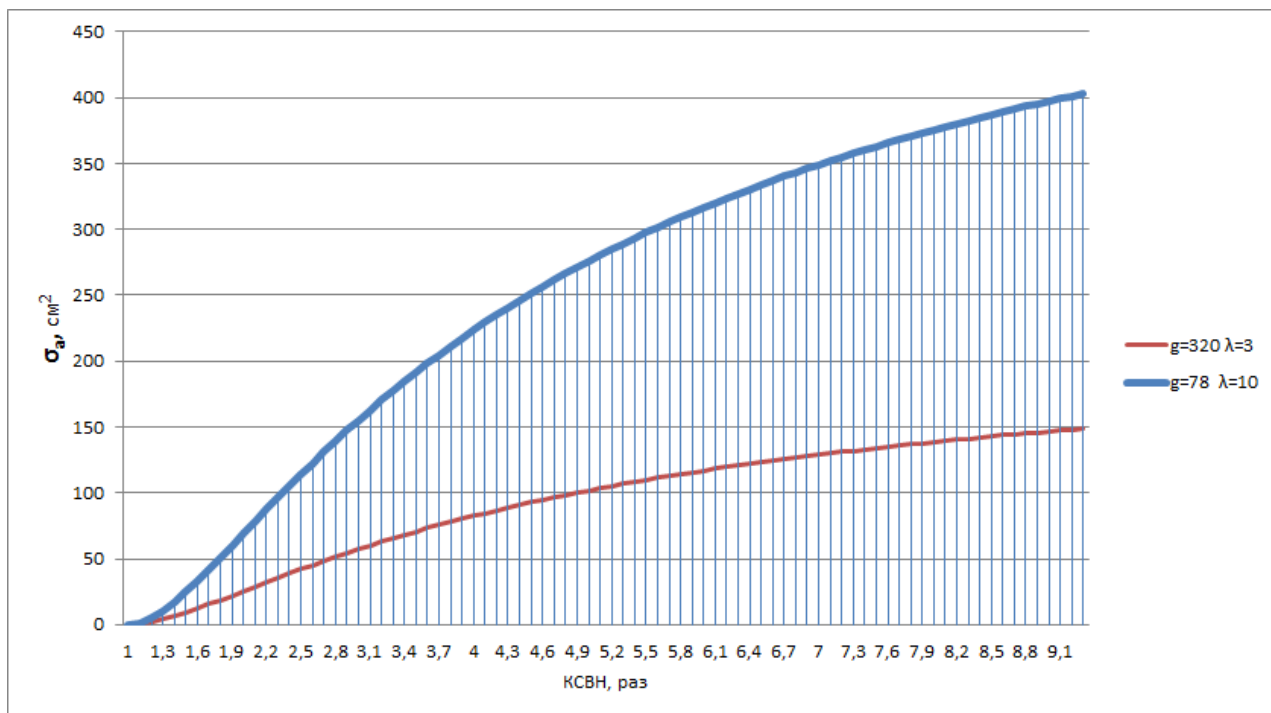


Рис. 2. Калибровочный график измерительной антенны П6-23М (зависимости эффективной площади и КУА от частоты)

Расчеты по предложенной методике проведены для частот 3, 7 и 10 ГГц (длины волн соответственно 10; 4,29 и 3 см).

Анализ полученных данных показывает, что значения антенной составляющей рупорной антен-

ны с ростом КСВН по абсолютной величине становятся соизмеримыми с эффективной площадью антенны на этой длине волн. Сравнительный анализ показывает: составляющая антенного рассеяния антенны П6-23М (рассчитанная по формуле (3) при

КСВН, равном 1,5) для длины волны $\lambda=10$ см составила 122 см^2 , тогда как эффективная площадь антенны на этой длине волны имеет значение 600 см^2 . При увеличении КСВН до 7 антенная составляющая рассеяния увеличивается до 400 см^2 .

Полученные предложенным расчетно-экспериментальным методом данные хорошо согласуются с результатами натурного эксперимента по измерению ЭПР антенны П6-23А [12], которые получены с помощью измерительного радиолокационного комплекса «Звено - 33».

Полученные результаты позволяют утверждать, что изменяя степень согласования антенны с нагрузкой, можно в достаточно больших пределах изменять интегральную ЭПР апертурной антенны. Это обстоятельство позволяет использовать антенны с простой геометрической конструкцией в качестве рабочих мер ЭПР [11].

Таким образом, предложена методика определения ЭПР апертурной антенны расчетно-экспериментальным методом, основанная на простой аналитической модели для расчета влияния количественного показателя согласования антенны с нагрузкой на пространственно-энергетическую эффективность и ЭПР антенны. Адекватность модели подтверждается результатами экспериментальных исследований. Доказательство существенного влияния КСВН на указанные характеристики антенн позволяет не только рассчитывать ЭПР (как в пределах, так и за пределами рабочей частотной полосы) антенн, но и регулировать их ЭПР в широкой полосе частот путем применения вентилей, поглощающих и поляризационных аттенуаторов, делителей мощности, поглотителей, согласованных нагрузок и других СВЧ устройств, включаемых в антенно-фидерный тракт.

Литература

1. Бененсон, Л.Д. Рассеяние электромагнитных волн антеннами [Текст] / Л.Д. Бененсон, Я.Н. Фельд // Радиотехника и электроника. - 1988. - Т. 33. - № 2. - С. 225 – 245.
2. Воскресенский, Д.И. Эффективная поверхность рассеяния остроаправленных антенн и антенных решеток. Вопросы снижения эффективной поверхности рассеяния [Текст] / Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарев, А.В. Шаталов; под ред. П.Я. Уфимцева. - М.: ИЭ РАН. - 1989. - С. 117 – 125.
3. Панычев, С.Н. Влияние характеристик рассеяния антенн на точность измерения параметров излучающих систем в ближней зоне [Текст] / С.Н. Панычев, Э.А. Соломин // Измерительная техника. - 1995. - № 5. - С. 56 – 58.
4. Гладышев, А.К. Влияние характеристик рассеяния антенны на показатели качества функционирования РЭС [Текст] / А.К. Гладышев, Е.Ф. Иванкин, С.Н. Панычев // Измерительная техника. - 1995. - № 2. - С. 48 – 50.
5. Еремин, В.Б. Характеристики рассеяния антенн и фазированных антенных решеток [Текст] / В.Б. Еремин, С.Н. Панычев // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. - 1997. - № 8. - С. 61 – 70.
6. Панычев, С.Н. Оценка влияния характеристик рассеяния антенны на энергетические параметры спутниковых систем связи [Текст] / С.Н. Панычев // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. - 2001. - № 3–4. - С. 74 – 79.

7. Панычев, С.Н. Косвенный метод определения структурной составляющей рассеяния антенны [Текст] / С.Н. Панычев, Э.А. Соломин // Радиопромышленность. - М.: НИИЭИР. - 1993. - С. 60 – 62.
8. Панычев, С.Н. Оценка влияния характеристик рассеяния измерительных антенн на точность измерения плотности потока энергии электромагнитного поля [Текст] / С.Н. Панычев, П.М. Мусабеков // Метрология. - 1998. - Т. 6. - С. 36 – 41.
9. Панычев, С.Н. Методика расчета энергетических потерь в радиоприемниках, обусловленных рассеянием радиоволн на антеннах СВЧ [Текст] / С.Н. Панычев // Антенны. - 2001. - № 5(51). - С. 68 – 70.
10. Гладышев, А.К. Экспериментально-расчетная модель оценки характеристик рассеяния апертурных антенн [Текст] / А.К. Гладышев, С.Н. Панычев, Е.Ф. Иванкин // Метрология. - 1993. - № 11. - С. 24 – 28.
11. Гладышев, А.К. Оценка возможности применения измерительных антенн в качестве рабочих мер ЭПР [Текст] / А.К. Гладышев, С.Н. Панычев, Е.Ф. Иванкин // Измерительная техника. - 1993. - № 2. - С. 57 – 59.
12. Ибрагимов, Н.Г. Методика и результаты эксперимента по исследованию характеристик отражения рупорной антенны в широком диапазоне частот [Текст] / Н.Г. Ибрагимов, С.Н. Панычев, В.А. Савинов. // Антенные измерения: сб. науч. трудов. Ереван: ВНИИРИ, 1990. - С. 191 – 192.
13. Кузнецов, А.А. Характеристики рассеяния линейных вибраторных решеток Ван-Атта [Текст] / А.А. Кузнецов // Журнал радиоэлектроники. - 2014. - № 5. - С. 37 – 43.
14. Волков, А. В. Синтез схемы дальномера-пеленгатора на основе процедур пересечения и объединения с обработкой сигнала во временной области [Текст] / А.В. Волков, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 4. - С. 12-14.
15. Оптимальный прием и обработка радиосигналов в нелинейном канале ВЧ-облучения для дистанционного снятия акустической информации [Текст] / В.Б. Авдеев, С.Н. Панычев, Н.Г. Денисенко, Н.А. Самоцвет, М.С. Скопин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 94-98.
16. Расчетно-инструментальный метод анализа прохождения случайного процесса через нелинейную цепь [Текст] / С.Н. Панычев, М.Ф. Пашук, В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, А.Е. Ломовских // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2014. - Т. 10. - № 5. - С. 109-113.
17. Экспериментально-расчетный метод определения двухсигнальной избирательности цифровых радиоприемных устройств [Текст] / В.М. Питолин, С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, С.А. Акулинин // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 6-3 С. 45-48.
18. Питолин, В.М. Анализ методов формирования сигналов и помех с заданными законами распределения параметров [Текст] / В.М. Питолин, Н.А. Самоцвет, А.В. Волков // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т. 9. - № 5-1. - С. 34-36.
19. Панычев, С.Н. Алгоритм формирования имитационных помех с заданными спектральными и информационными свойствами [Текст] / С.Н. Панычев, С.В. Су-

ровцев, С.В. Канавин // Радиолокация, навигация, связь (RLNC- 2013): труды XIX Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2013. - Т. 3. - С. 2012-2017.

20. Панычев, С.Н. Когнитивный алгоритм корреляционно-фильтровой обработки сложных сигналов на фоне гауссовых шумов [Текст] / С.Н. Панычев, С.В. Суровцев, Н.А. Самоцвет / Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2014): труды XX Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2014. - Т. 4. - С. 2000-2008.

21. Экспериментально-расчетный метод определения двухсигнальной избирательности цифровых радиоприемных устройств [Текст] / С.Н. Панычев, В.М. Питонин, Н.А. Самоцвет, С.В. Суровцев // Интеллектуальные информационные системы: материалы ежегодной Всерос. конф. - Воронеж: ВГТУ, 2014. - С. 4-8.

22. Панычев, С.Н. Методы формирования и обработки радиопомех с учетом их статистических свойств на основе технологий векторной генерации и анализа радио-

сигналов [Текст] / С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, Е.А. Сытник // Актуальные вопросы развития систем и средств ВКО: материалы IV науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов. - М.: ГСКБ «Алмаз-Антей», - 2013. - С. 300-306.

23. Авдеев, В.Б. Особенности современных методов моделирования приема и обработки случайных радиосигналов на фоне шумов и помех [Текст] / В.Б. Авдеев, С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. – Воронеж: Воронежский институт ФСИН России, 2013. - № 4. - С. 90-97.

24. Панычев, С.Н. Моделирование приёма и обработки случайных радиосигналов и помех [Текст] / С.Н. Панычев, Н.А. Самоцвет, М.С. Сковпин // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. - Воронеж: ВГТУ, 2013. - С. 18-19.

Воронежский государственный технический университет

Центр системных исследований и разработок - филиал ОАО «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы» (г. Воронеж)

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL METHODOLOGY FOR IMPACT ASSESSMENT COORDINATION WITH THE LOAD CHARACTERISTICS OF THE ANTENNAS

S.N. Panychev, M.F. Pashuk, N.A. Samotcvet, A.A. Seregin, S.V. Surovtsev

Justification of simple analytical experimental model for calculation of characteristics of strengthening and dispersion of aperture antennas is given. Influence of standing wave ratio (SWR) in an antenna feeder and antenna's coefficient of strengthening on the effective surface of dispersion (ESD), and also interrelation of the specified characteristics are shown. The example of the horn antenna's measuring of ESD definition by a settlement and experimental method on the basis of the offered definition of integrated antenna's ESD technique is given

Key words: ESD, SWR, strengthening, dispersion, aperture

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

С.А. Белоусов, Ю.В. Иванов, А.А. Носов, С.И. Рембеза

В статье рассмотрена конструкция прозрачного тонкопленочного полевого транзистора с нижним расположением затвора. Обоснован выбор состава металлооксидных пленок и их параметров для использования в качестве элементов конструкции прозрачного тонкопленочного полевого транзистора

Ключевые слова: металлооксиды, тонкие пленки, полевой транзистор

Прозрачная электроника как новое направление развития микроэлектроники появилось недавно [1] и в настоящее время активно развивается в США [1], в Юго-восточной Азии [2] и в Европе [3]. Основным материалом прозрачной электроники являются тонкие металлооксидные пленки, которые представляют собой широкозонные полупроводники [4], прозрачные в видимом оптическом диапазоне.

Одним из первых изделий прозрачной электроники был металлооксидный тонкопленочный полевой транзистор для обеспечения коммутации столбец-строка в прозрачных дисплеях на основе органических светодиодов (OLED) [3]. Для изготовления полевого транзистора необходимо иметь прозрачные хорошо проводящие пленки для истока, стока и затвора, прозрачную диэлектрическую пленку с определенной удельной емкостью для использования в качестве диэлектрика и пленку для канала транзистора с концентрацией свободных носителей зарядов 10^{15}см^{-3} – 10^{17}см^{-3} . Таким образом, каждый элемент конструкции прозрачного транзистора должен иметь определенные электрофизические параметры.

Цель данной работы – разработка физических основ технологии изготовления металлооксидных пленок с электрофизическими параметрами, пригодными для синтеза всех элементов конструкции прозрачного полевого транзистора с нижним расположением затвора.

На рис. 1 приведена типичная конструкция прозрачного полевого транзистора с нижним расположением затвора [3]. В этом транзисторе исток, сток и затвор изготовлены из низкоомной пленки ИТО (In_2O_3 +10% SnO_2).

Диэлектрик представляет собой многослойную структуру TiO_2 и Al_2O_3 , изготовленную методом атомно-слоевого нанесения для обеспечения

удельной емкости $\sim 60\text{нФ/см}^2$. Пленка диэлектрика изготовлена методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В прозрачных полевых транзисторах канал изготавливают из SnO_2 , ZnO или из многокомпонентных металлооксидов на их основе [3]. Основные требования к материалу канала – это заданные значения концентрации свободных носителей и величины их подвижности, а также минимизация числа дефектов на границах раздела диэлектрик – канал и исток, сток – канал.

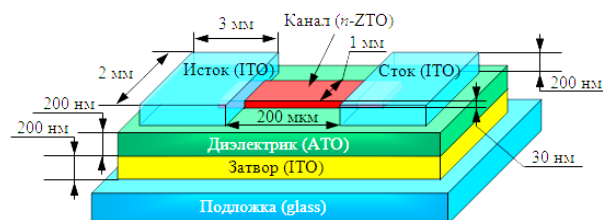


Рис. 1. Типичная конструкция прозрачного полевого транзистора с нижним расположением затвора

В данном транзисторе [3] канал изготовлен методом плазменного осаждения, стимулированного лазером, из мишени, содержащей одинаковые количества ZnO и SnO_2 . При таком соотношении компонентов образуется новая фаза Zn_2SnO_4 , поэтому в своих исследованиях мы использовали мишень, изготовленную из этой трехкомпонентной фазы. Так как толщина канала обычно не превышает 200 нм, то концентрация носителей в нем должна обеспечивать распространение пространственного заряда на всю толщину канала при наличии небольшого ($< 10\text{В}$) напряжения смещения на затворе. Этим условиям соответствуют значения концентраций свободных носителей в интервале $(10^{15}\div 10^{17})\text{см}^{-3}$. Величина подвижности носителей заряда определяет наклон вольт-амперной характеристики и для большинства металлооксидов не превышает $100\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Удельным электросопротивлением канала ограничивается максимальный ток, который может протекать между истоком и затвором транзистора, поэтому не целесообразно создавать приборную структуру с минимальными значениями концентрации носителей заряда в канале.

Белоусов Сергей Алексеевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: heroy777@mail.ru

Иванов Юрий Васильевич – ВГТУ, студент, e-mail: madsurfinzombie@gmail.com

Носов Андрей Андреевич – ВГТУ, магистрант, e-mail: sir.baters@yandex.ru

Рембеза Станислав Иванович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: rembeza@yandex.ru

Для изготовления прозрачных металлооксидных пленок используются методики ионно-лучевого и магнетронного распыления керамических мишеней на переменном токе [5], ионно-плазменного и химического осаждения, золь-гель технологии [6] и другие методы синтеза. В нашей работе будут рассмотрены образцы пленок, синтезированных ионно-лучевым и магнетронным распылением на переменном токе [7].

Для получения канала полевого транзистора была изготовлена керамическая мишень из фазы оксидов Zn_2SnO_4 методом сухого прессования. Распыление мишени осуществлялось в установке магнетронного распыления на переменном токе Angstrom E.I. Covar II в атмосфере Ar, в течение 5 часов до получения пленки толщиной 2 мкм (измерено эллипсометром ЛЭФ-753). Рентгеновский элементный анализ (JEOL-840) показал, что атомный состав пленки соответствует составу распыленной мишени с дефицитом кислорода. Сразу после изготовления пленки были практически не прозрачны, имели концентрацию носителей заряда $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и подвижность $45 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Низкоомная пленка с указанными параметрами не может быть использована в качестве канала транзистора. Поэтому для дополнительного окисления пленок и снижения концентрации носителей зарядов выполнялся отжиг на воздухе при $T=500^\circ\text{C}$ в течение 4 часов. В результате отжига пленки стали прозрачными ($T \sim 70\div 80\%$), концентрация носителей заряда упала до величины $1,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а подвижность стала $30 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Такие параметры пленок соответствуют требованиям, предъявляемым к электрофизическим свойствам канала полевого транзистора.

Пленка диэлектрика изготавливалась методом ионно-лучевого распыления мишени на основе TiO_2 с примесью SiO_2 , т.к. необходимо было получить пленку заданной толщины с конкретным значением удельной емкости. Для определения оптимального элементного состава пленки $\text{TiO}_2+\text{SiO}_2$ изготавливалась наборная мишень из TiO_2 с вставками SiO_2 по методике, описанной в работе [7], что позволило получить пленки TiO_2 с содержанием кремния от 8,8 до 16,7 % (JEOL-840).

Пленки диэлектрика были прозрачны с коэффициентом пропускания T в видимом оптическом диапазоне от 60 до 80 %, (рис. 2). Так как все исследуемые пленки имели одинаковую толщину, то из характера расположения интерференционных максимумов на рис. 2 следует, что с уменьшением содержания Si от 16,7 до 8,8 % в TiO_2 коэффициент преломления пленок (n) увеличивается. Из интерференционных максимумов и минимумов спектров пропускания были рассчитаны значения коэффициентов преломления (n) и диэлектрической проницаемости (ϵ) пленок с различным составом. Эти значения ϵ изменялись от 2,7 до 15,5 по мере уменьшения содержания Si в пленках TiO_2 . Установлено, что пленки TiO_2 с добавлением 8,8 % Si обладают заданной емкостью $\sim 50 \text{ нФ/см}^2$, что соответствует требованиям к

диэлектрическим свойствам пленок толщиной 200 нм, используемых в качестве диэлектрика в прозрачном полевом транзисторе.

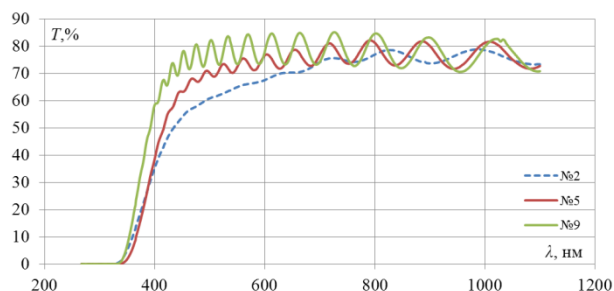


Рис. 2. Коэффициенты пропускания тонких пленок $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ для образцов с различной концентрацией кремния (№ 2 – 16,7 % Si, № 5 – 13 % Si, № 9 – 8,8 % Si)

Таким образом, ионно-лучевое или магнетронное распыление на переменном токе керамических мишеней состава $\text{TiO}_2 + 8,8 \text{ \% Si}$ может быть использовано для изготовления диэлектрических слоев полевого прозрачного транзистора.

В качестве материала для истока, стока и затвора полевого транзистора чаще всего используются низкоомные пленки ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$). Оксид индия, являясь основой этих пленок, непрерывно растет в цене, увеличивая стоимость транзисторов и прозрачных дисплеев. Поэтому многими исследователями проводятся поисковые работы по замене дорогостоящих пленок ИТО на более дешевые прозрачные и низкоомные материалы. Одним из таких материалов является пленка SnO_2 с примесью нескольких процентов Sb_2O_3 [8].

Для определения оптимального соотношения SnO_2 и Sb_2O_3 нами использовалась керамическая составная мишень на основе SnO_2 с несколькими вставками Sb_2O_3 , которая распылялась ионно-лучевым методом на переменном токе. Были получены аморфные прозрачные образцы желто-оранжевого цвета, электрические параметры которых сразу после синтеза не промерялись. Концентрация Sb в синтезированных пленках изменялась от 0,2 до 14,45 ат. %. По результатам более ранних работ [8, 9] известно, что низкоомные прозрачные пленки SnO_2 могут быть получены при добавлении $\sim 10 \text{ \% Sb}_2\text{O}_3$, что соответствует содержанию Sb $\sim 4 \text{ \%}$. Тонкие прозрачные низкоомные пленки могут быть использованы в качестве истока, стока и затвора в прозрачном полевом транзисторе. Полученные нами результаты подтверждают возможность замены дорогостоящих пленок ИТО в технологии изготовления изделий прозрачной электроники на более доступную и дешевую пленку SnO_2 с добавкой Sb_2O_3 , параметры которой сравнимы с параметрами низкоомных прозрачных пленок, изготовленных из ИТО ($\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$).

В результате выполненных исследований разработана методика синтеза прозрачных тонких

пленок для изготовления всех элементов конструкции прозрачного полевого транзистора: канала, диэлектрика, истока, стока и затвора.

Для изготовления канала впервые использована керамическая мишень трехкомпонентного состава Zn_2SnO_4 и определены режимы и условия термообработки для управления прозрачностью и электрическими параметрами пленок. Изготовлены пленки с оптимальными параметрами для использования в качестве канала полевого транзистора.

Пленки TiO_2 с примесью SiO_2 могут быть использованы в качестве диэлектрика в полевом транзисторе вместо дорогостоящих послойно наносимых методом молекулярно-лучевой эпитаксии пленок TiO_2 и Al_2O_3 . Пленки диэлектрика и пленки канала полевого транзистора можно синтезировать последовательным магнетронным распылением двух мишеней на переменном токе в одном технологическом процессе.

Дорогостоящие пленки ИТО, широко используемые в настоящее время для истока, стока и затвора, можно заменить низкоомными прозрачными пленками ($SnO_2 + Sb_2O_3$), изготавливаемыми на переменном токе. В работе установлено оптимальное соотношение между компонентами во всех пленках, используемых для изготовления прозрачного полевого транзистора.

Авторы благодарят профессора А.В. Ситникова за помощь при изготовлении образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства науки и образования по проекту № 280 и задания № 3.574.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Wager, J.F. Transparent Electronics [Text] / J.F. Wager // Science. - 2003. - Vol. 300. - P. 1245-1246.
2. Wang, L. High-performance transparent inorganic-organic hybrid thin-film n-type transistors [Text] / L. Wang, M.H. Yoon, G. Lu, Y. Yang, A. Facchetti, T.J. Marks // Nat. Mater. - 2006. - Vol. 5. - № 11. - P. 893-900.
3. Riedl, T. Transparent electronics for see-through AMOLED displays [Text] / T. Riedl, P. Görrn, W. Kowalsky // J. of display technology. - 2009. - Vol. 5. - № 12. - P. 501-509.
4. Физико-химические свойства оксидов [Текст] / под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. - 472 с.
5. Формирование пленок диоксида олова с вертикально ориентированными нанопорами [Текст] / В.В. Симаков, И.В. Синев, А.В. Смирнов, С.Д. Сякина, А.И. Гребенников, В.В. Кисин // Нанотехника. - 2011. - № 3. - С. 45-46.
6. Особенности синтеза и исследования нанокompозитных пленок, полученных методом золь-гель-технологии [Текст] / И.А. Аверин, А.А. Карманов, В.А. Мошников, Р.М. Печерская, И.А. Пронин // Известия вузов. Поволжский регион. Сер. Физико-математические науки. - 2012. - № 2 (22). - С. 155-162.
7. Изготовление и структура пленок многокомпонентных металлооксидов $(SnO_2)_x:(ZnO)_{1-x}$ ($x = 0-1$) [Текст] / С.И. Рембеза, Е.С. Рембеза, Е.Ю. Плотникова, Т.В. Свистова, Е. Suvaci, E. Özel, G. Tunoculu, C. Açikşari // Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии (НАНСИС-2013): тезисы IV Междунар. науч. конф. – Киев, 2013.
8. Sol-Gel Deposited Sb-Doped Tin Oxide Films [Text] / M. Guglielmi, E. Menegazzo, M. Paolizzi, G. Gasparro, D. Ganz, J. P. Utz and M.A. Aegerter, L. Hubert-Pfalzgraf, Pascual and A. Dur´ An, H.X. Willems and M. Van Bommel, L. B. Uttgenbach, L. Costa // Journal of Sol-Gel Science and Technology. - 1998. - Vol. 13. - Issues 1-3. - P. 679-683.
9. Transparent conducting sol gel ATO coatings for display applications by an improved dip coating technique [Text] / G. Guzman, B. Dahmani, J. Puetz, M.A. Aegerter // Thin Solid Films. - 2006. - Vol. 502. - Issues 1-2. - P. 281-285.

Воронежский государственный технический университет

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MANUFACTURING TRANSPARENT THIN FILM TRANSISTORS

S.A. Belousov, Y.V. Ivanov, A.A. Nosov, S.I. Rembeza

In the article examined design of transparent thin film field transistor with bottom gate. Argmented elements composition and electrical properties of metaloxide films using as construction of transparent thin film field transistor

Key words: metaloxides, thin films, field effect transistor

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ «ДВОЙНИК-ТРЕЩИНА НОРМАЛЬНОГО ОТРЫВА В ЗЕРНЕ ПОЛИКРИСТАЛЛА»

Т.В. Дробышевская, О.М. Остриков

С использованием численно-аналитических методов расчета изучено поле напряжений, создаваемое распределением дислокаций в системе «двойник-трещина в зерне поликристалла». Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния данной системы. Рассчитаны компоненты тензора напряжений в зерне поликристалла, содержащем единичный остаточный клиновидный двойник и трещину нормального отрыва. Установлено, что максимальные растягивающие напряжения сконцентрированы у вершины двойника, а сжимающие – у вершины трещины, удаленной от вершины двойника. Выявлены закономерности распределения полей напряжений в зерне поликристалла при наличии в нем некогерентного остаточного двойника и трещины нормального отрыва

Ключевые слова: двойникование, дислокационные модели, прогнозирование разрушения

Введение. Вопросы прочности и долговечности являются важнейшими с точки зрения практического применения деталей машин. Именно поэтому изучение процессов разрушения было и остается актуальной задачей в современных исследованиях. Влияние двойникования на процесс образования микротрещин и последующего разрушения материала неоднократно рассматривалось такими авторами, как В.М. Финкель, В.А. Федоров, Ю.И. Тялин и др. [1] – [3]. При этом взаимосвязь двойникования с процессами формирования микротрещин является не до конца изученной. Следует отметить, что изучение обозначенных выше процессов целесообразно проводить с точки зрения анализа напряженно-деформированного состояния в соответствии с методами, предложенными в [4] и [5].

Цель данной работы – разработка метода расчета напряженно-деформированного состояния в зерне поликристалла, содержащем единичный двойник и трещину нормального отрыва, а также изучение данного состояния.

Постановка задачи. Как уже было отмечено выше, в качестве объекта исследования выбрано зерно поликристалла, содержащее единичный двойник и трещину нормального отрыва. При этом рассмотрим зерна поликристалла различной формы – правильные четырех-, пяти-, шести- и семиугольники, так как такая форма зерен является наиболее распространенной. В данной задаче рассмотрим клиновидный двойник, зарождающийся у концен-

тратора напряжений на границе зерна (точка O на рис. 1). При расчете напряженно-деформированного состояния и его анализе будем учитывать напряжения, создаваемые элементами системы: зеренными и двойниковыми границами, трещиной. С целью уменьшения громоздкости решения все иные источники напряжений (концентратор напряжений, границы соседних зерен поликристалла и др.) учитывать не будем.

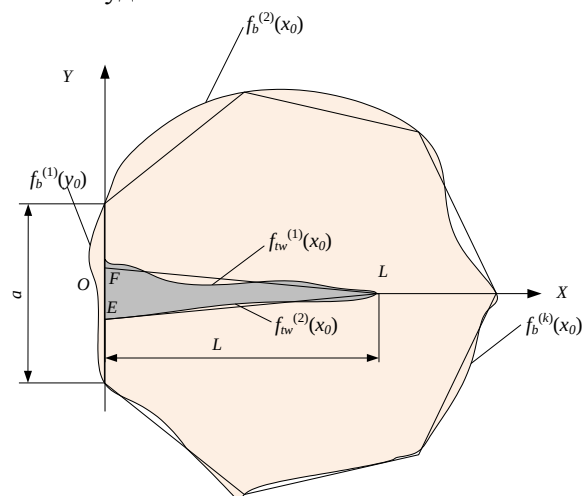


Рис. 1. Изображение зерна поликристалла, содержащего систему «двойник-трещина»

В общем случае профили элементов рассматриваемой системы в плоскости XOY описываются следующим образом. Форма зеренных границ функциями $f_b^{(1)}(y_0)$, $f_b^{(2)}(x_0)$, ..., $f_b^{(n)}(x_0)$, где n – количество зеренных границ; форма границ клиновидного двойника – функциями $f_{bw}^{(1)}(x_0)$ и $f_{bw}^{(2)}(x_0)$; форма границы трещины – функцией $f_{cr}(x_0)$ (рис. 1) [5], [6]. При этом дислокации на каждой из рассматриваемой

мых границ параллельны друг другу и оси OZ , перпендикулярной плоскости (рис. 1).

В поставленной задаче рассматриваемую систему моделируем дислокационной моделью, представленной на рис. 2. Так, границы зерна представлены в виде стенок полных краевых дислокаций (граница чистого наклона), двойниковые границы – в виде скопления частичных дислокаций. Трещина нормального отрыва в соответствии с дислокационной моделью, предложенной В.И. Астафьевым [4], смоделирована в виде стенки полных краевых дислокаций. Плотность полных и частичных дислокаций элементов системы равна $\rho_b^{(1)}, \rho_b^{(2)}, \dots, \rho_b^{(n)}$ для зеренных границ; $\rho_{bw}^{(1)}, \rho_{bw}^{(2)}$ для двойниковых границ и ρ_{cr} для границ трещины.

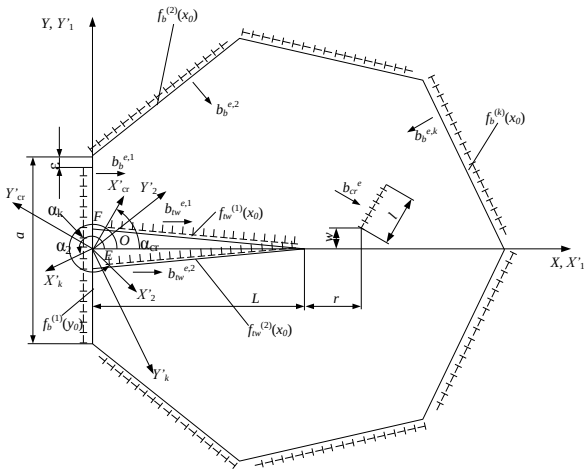


Рис. 2. Схема расположения дислокаций, их компонент вектора Бюргерса и декартовых систем координат для расчета полей напряжений и смещений в системе «двойник-трещина нормального отрыва в зерне поликристалла»

В соответствии с поставленной задачей смещения и напряжения, характеризующие рассматриваемую систему, в соответствии с принципом суперпозиции [6] определяем по формуле:

$$\begin{pmatrix} u_i \\ \sigma_{ij} \end{pmatrix} = \sum_{m=1}^2 \begin{pmatrix} (u_i^{(m)})_{bw} \\ (\sigma_{ij}^{(m)})_{bw} \end{pmatrix} (x, y) + \sum_{k=1}^n \begin{pmatrix} (u_i^{(k)})_b \\ (\sigma_{ij}^{(k)})_b \end{pmatrix} (x, y) + \begin{pmatrix} (u_i)_{cr} \\ (\sigma_{ij})_{cr} \end{pmatrix} (x, y). \quad (1)$$

Здесь i, j принимают значения x или y ; $(u_i^{(m)})_{bw}(x, y), (\sigma_{ij}^{(m)})_{bw}(x, y)$ – смещения и напряжения, создаваемые m -й двойниковой границей; $(u_i^{(k)})_b(x, y), (\sigma_{ij}^{(k)})_b(x, y)$ – смещения и напряжения, создаваемые k -й зеренной границей; $(u_i)_{cr}(x, y), (\sigma_{ij})_{cr}(x, y)$ – смещения и напряжения, создаваемые трещиной.

Смещения и напряжения, обусловленные двойниковыми границами, определяются в соответствии с методикой, разработанной О. М. Остриковым [5]:

$$\begin{pmatrix} (u_i^{(m)})_{bw} \\ (\sigma_{ij}^{(m)})_{bw} \end{pmatrix} = \int \rho_{bw}^{(m)} \begin{pmatrix} (u_i^{(m,0)})_{bw} \\ (\sigma_{ij}^{(m,0)})_{bw} \end{pmatrix} (x, y) ds. \quad (2)$$

Здесь $(u_i^{(m,0)})_{bw}(x, y)$ и $(\sigma_{ij}^{(m,0)})_{bw}(x, y)$ – смещения и напряжения, создаваемые отдельными дислокациями на двойниковых границах.

Криволинейные интегралы (2) представим в виде определенных интегралов в соответствии с методикой, описанной в [5]:

$$\begin{pmatrix} (u_i^{(m)})_{bw} \\ (\sigma_{ij}^{(m)})_{bw} \end{pmatrix} = \int_0^L \sqrt{1 + (f_{bw}^{(m)}(x_0))^2} \rho_{bw}^{(m)} \times \begin{pmatrix} (u_i^{(m,0)})_{bw} \\ (\sigma_{ij}^{(m,0)})_{bw} \end{pmatrix} (x, y, x_0) dx_0, \quad (3)$$

где L – длина двойника (рис. 1).

Смещения и напряжения, создаваемые двойникоующими дислокациями, определяем из соотношений [5]:

$$\begin{aligned} (u_x^{(m,0)})_{bw} &= \frac{b_{bw}^e}{2\pi} \left[\arctg \frac{y - f_{bw}^{(m)}(x_0)}{x - x_0} + \frac{(y - f_{bw}^{(m)}(x_0))(x - x_0)}{2(1-\nu)((y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2 + (x - x_0)^2)} \right], \\ (u_y^{(m,0)})_{bw} &= -\frac{b_{bw}^e}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{2\pi} \ln((y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2 + (x - x_0)^2) + \frac{(x - x_0)^2 - (y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2}{4(1-\nu)((y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2 + (x - x_0)^2)} \right]; \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{xx}^{(m,0)})_{bw} &= -\frac{\mu b_{bw}^e}{2\pi(1-\nu)} \times \frac{(y - f_{bw}^{(m)}(x_0)) [3(x - x_0)^2 + (y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2]^2}, \\ (\sigma_{yy}^{(m,0)})_{bw} &= \frac{\mu b_{bw}^e}{2\pi(1-\nu)} \times \frac{(y - f_{bw}^{(m)}(x_0)) [(x - x_0)^2 - (y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2]^2}, \\ (\sigma_{xy}^{(m,0)})_{bw} &= \frac{\mu b_{bw}^e}{2\pi(1-\nu)} \times \frac{(x - x_0) [(x - x_0)^2 - (y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2]}{[(x - x_0)^2 + (y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2]^2}, \\ (\sigma_{zz}^{(m,0)})_{bw} &= -\frac{\mu b_{bw}^e \nu}{\pi(1-\nu)} \times \frac{y - f_{bw}^{(m)}(x_0)}{(x - x_0)^2 + (y - f_{bw}^{(m)}(x_0))^2}. \quad (5) \end{aligned}$$

Здесь ν – коэффициент Пуассона; μ – модуль сдвига; b_{bw}^e – модуль краевой составля-

ющей вектора Бюргерса частичной двойникующей дислокации.

Аналогичным образом определяем смещения и напряжения, обусловленные полными краевыми зернограницными дислокациями [5]:

$$\begin{pmatrix} u_i^{(k)} \\ \sigma_{ij}^{(k)} \end{pmatrix}_b = \int \rho_b^{(k)} \begin{pmatrix} u_i^{(k,0)} \\ \sigma_{ij}^{(k,0)} \end{pmatrix}_b(x, y) ds, \quad (6)$$

где $(u_i^{(k,0)})_b(x, y)$ и $(\sigma_{ij}^{(k,0)})_b(x, y)$ – смещения и напряжения, создаваемые отдельными дислокациями на зеренных границах.

Криволинейные интегралы (6) представляем в виде определенных интегралов в соответствии с методикой, описанной в [5]:

$$\begin{pmatrix} u_i^{(k)} \\ \sigma_{ij}^{(k)} \end{pmatrix}_b = \int_{x_k}^{x_{k+1}-\varepsilon} \sqrt{1 + (f_b^{(k)}(x_0))^2} \rho_b^{(k)} \times \begin{pmatrix} u_i^{(k,0)} \\ \sigma_{ij}^{(k,0)} \end{pmatrix}_b(x, y, x_0) dx_0; \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} u_i^{(k)} \\ \sigma_{ij}^{(k)} \end{pmatrix}_b = \int_{y_k}^{y_{k+1}-\varepsilon} \sqrt{1 + (f_b^{(k)}(y_0))^2} \rho_b^{(k)} \times \begin{pmatrix} u_i^{(k,0)} \\ \sigma_{ij}^{(k,0)} \end{pmatrix}_b(x, y, y_0) dy_0, \quad (8)$$

где $x_k, x_{k+1}, y_k, y_{k+1}$ – координаты начальной и конечной точек k -й границы зерна; ε – малый параметр порядка межатомного расстояния.

Смещения и напряжения, создаваемые отдельными полными краевыми зернограницными дислокациями, определяем в системах координат $X'_k Y'_k Z$ (рис. 2) с последующим преобразованием их в напряжения и смещения в системе координат XYZ . Для определения смещений и напряжений, создаваемых отдельными зернограницными дислокациями в системах координат $X'_k Y'_k Z$, используем соотношения [5]:

$$\begin{aligned} (u_{x'_k}^{(k,0)})_b &= \frac{b_b^e}{2\pi} \left[\arctg \frac{y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0})}{x'_k - x'_{k,0}} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))(x'_k - x'_{k,0})}{2(1-\nu)((y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2 + (x'_k - x'_{k,0})^2)} \right], \\ (u_{y'_k}^{(k,0)})_b &= -\frac{b_b^e}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{2\pi} \ln((y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2 + \right. \\ &\quad \left. + (x'_k - x'_{k,0})^2) + \frac{(x'_k - x'_{k,0})^2 - (y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2}{4(1-\nu)((y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2 + (x'_k - x'_{k,0})^2)} \right]; \\ (u_{x'_k}^{(k,0)})_b &= \frac{b_b^e}{2\pi} \left[\arctg \frac{y'_k - y'_{k,0}}{x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0})} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))(y'_k - y'_{k,0})}{2(1-\nu)((x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 + (y'_k - y'_{k,0})^2)} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (u_{y'_k}^{(k,0)})_b &= -\frac{b_b^e}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{2\pi} \ln((x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 + \right. \\ &\quad \left. + (y'_k - y'_{k,0})^2) + \frac{(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 - (y'_k - y'_{k,0})^2}{4(1-\nu)((x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 + (y'_k - y'_{k,0})^2)} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{x'_k x'_k}^{(k,0)})_b &= -\frac{\mu b_b^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))[3(x'_k - x'_{k,0})^2 + (y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2]}{[(x'_k - x'_{k,0})^2 + (y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2]^2}, \\ (\sigma_{y'_k y'_k}^{(k,0)})_b &= \frac{\mu b_b^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))[3(x'_k - x'_{k,0})^2 - (y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2]}{[(x'_k - x'_{k,0})^2 + (y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2]^2}, \\ (\sigma_{x'_k y'_k}^{(k,0)})_b &= \frac{\mu b_b^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(x'_k - x'_{k,0})[(x'_k - x'_{k,0})^2 - (y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2]}{[(x'_k - x'_{k,0})^2 + (y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2]^2}, \\ (\sigma_{zz}^{(k,0)})_b &= -\frac{\mu b_b^e \nu}{\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0})}{(x'_k - x'_{k,0})^2 + (y'_k - f_b^{(k)}(x'_{k,0}))^2}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{x'_k x'_k}^{(k,0)})_b &= -\frac{\mu b_b^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(y'_k - y'_{k,0})[3(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 + (y'_k - y'_{k,0})^2]}{[(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 + (y'_k - y'_{k,0})^2]^2}, \\ (\sigma_{y'_k y'_k}^{(k,0)})_b &= \frac{\mu b_b^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(y'_k - y'_{k,0})[(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 - (y'_k - y'_{k,0})^2]}{[(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 + (y'_k - y'_{k,0})^2]^2}, \\ (\sigma_{x'_k y'_k}^{(k,0)})_b &= \frac{\mu b_b^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))[3(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 - (y'_k - y'_{k,0})^2]}{[(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 + (y'_k - y'_{k,0})^2]^2}, \\ (\sigma_{zz}^{(k,0)})_b &= -\frac{\mu b_b^e \nu}{\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{y'_k - y'_{k,0}}{(x'_k - f_b^{(k)}(y'_{k,0}))^2 + (y'_k - y'_{k,0})^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь b_b^e – модуль вектора Бюргерса полной краевой дислокации. Выбор формул для расчета смещений и напряжений на зеренных границах зависит от способа задания функции соответствующей границы. В случае задания функции как $f(x)$ используются формулы (9), (11); в случае $f(y)$ – формулы (10), (12).

Для преобразования координат и компонент тензоров напряжений и смещений в соответствующую систему координат (XYZ или $X'_kY'_kZ$) используем следующие соотношения [7]:

$$x' = x \cdot \cos(\alpha) + y \cdot \sin(\alpha), \quad (13)$$

$$y' = -x \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha); \quad (14)$$

$$x'_0 = x_0 \cdot \cos(\alpha) + y_0 \cdot \sin(\alpha), \quad (15)$$

$$y'_0 = -x_0 \cdot \sin(\alpha) + y_0 \cdot \cos(\alpha); \quad (16)$$

$$f^{(i)}(y'_0) = x_0 \cdot \cos(\alpha) + f(y_0) \cdot \sin(\alpha), \quad (17)$$

$$f^{(i)}(x'_0) = -f(x_0) \cdot \sin(\alpha) + y_0 \cdot \cos(\alpha); \quad (18)$$

$$(u^{(0)}_x) = (u^{(0)}_{x'}) \cdot \cos(\alpha) - (u^{(0)}_y) \cdot \sin(\alpha); \quad (19)$$

$$(u^{(0)}_y) = (u^{(0)}_{x'}) \cdot \sin(\alpha) + (u^{(0)}_y) \cdot \cos(\alpha); \quad (20)$$

$$(\sigma^{(0)}_{xx}) = (\sigma^{(0)}_{x'x'}) \cdot \cos^2(\alpha) + (\sigma^{(0)}_{y'y'}) \cdot \sin^2(\alpha) - \\ - (\sigma^{(0)}_{x'y'}) \cdot \sin(2\alpha); \quad (21)$$

$$(\sigma^{(0)}_{yy}) = (\sigma^{(0)}_{x'x'}) \cdot \sin^2(\alpha) + (\sigma^{(0)}_{y'y'}) \cdot \cos^2(\alpha) + \\ + (\sigma^{(0)}_{x'y'}) \cdot \sin(2\alpha); \quad (22)$$

$$(\sigma^{(0)}_{xy}) = \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \left[(\sigma^{(0)}_{x'x'}) - (\sigma^{(0)}_{y'y'}) \right] + (\sigma^{(0)}_{x'y'}) \times \\ \times \cos(2\alpha). \quad (23)$$

Здесь α принимает значения α_k либо α_σ ; α_k – угол поворота системы координат k -ой зеренной границы $X'_kY'_kZ$ относительно системы координат XYZ , либо угол поворота системы координат трещины $X'_\sigma Y'_\sigma Z$ относительно системы координат XYZ (рис. 2); $(\sigma^{(0)}_{ij})$ – компоненты тензора напряжений в системе XYZ , $(\sigma^{(0)}_{ij})$ – компоненты тензора напряжений в системе $X'_\sigma Y'_\sigma Z$.

Смещения и напряжения, обусловленные влиянием образованной в зерне трещины, рассчитываем с учетом работ В.И. Астафьева [4], О.М. Острикова [5] и других авторов:

$$\begin{pmatrix} u_i \\ \sigma_{ij} \end{pmatrix}_{\sigma}(x, y) = \int \rho_{\sigma} \begin{pmatrix} u_i^{(0)} \\ \sigma_{ij}^{(0)} \end{pmatrix}_{\sigma}(x, y) ds. \quad (24)$$

Здесь $(u_i^{(0)})_{\sigma}(x, y)$ и $(\sigma_{ij}^{(0)})_{\sigma}(x, y)$ – смещения и напряжения, создаваемые отдельными дислокациями трещины.

Криволинейные интегралы (24) представим в виде определенных интегралов в соответствии с методикой, описанной в [5]:

$$\begin{pmatrix} u_i \\ \sigma_{ij} \end{pmatrix}_{\sigma}(x, y) = \int_{x_0^l}^{x_0^f} \sqrt{1 + (f_{\sigma}^{(m)}(x_0))^2} \rho_{\sigma} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} u_i^{(0)} \\ \sigma_{ij}^{(0)} \end{pmatrix}_{\sigma}(x, y, x_0) dx_0, \quad (25)$$

где l – длина трещины (рис. 1); x_0^0 и x_0^f – координаты начальной и конечной точек трещины.

Смещения и напряжения, обусловленные отдельными дислокациями трещины, определяем в системе координат $X'_\sigma Y'_\sigma Z$ (рис. 2) с последующим преобразованием их в систему XYZ (13) – (23):

$$\begin{aligned} (u^{(0)}_{x'})_{\sigma} &= -\frac{b_{\sigma}^e}{2\pi} \left[\frac{1-2\nu}{2\pi} \ln \left((y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (x' - x'_{\sigma,0})^2 \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2 - (x' - x'_{\sigma,0})^2}{4(1-\nu)((y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2 + (x' - x'_{\sigma,0})^2)} \right]; \\ (u^{(0)}_{y'})_{\sigma} &= \frac{b_{\sigma}^e}{2\pi} \left[\arctg \frac{x' - x'_{\sigma,0}}{y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0})} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(x' - x'_{\sigma,0})(y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))}{2(1-\nu)((y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2 + (x' - x'_{\sigma,0})^2)} \right]; \quad (26) \\ (\sigma^{(0)}_{x'x'})_{\sigma} &= \frac{\mu b_{\sigma}^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(x' - x'_{\sigma,0})((y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2 - (x' - x'_{\sigma,0})^2)}{[(x' - x'_{\sigma,0})^2 + (y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2]^2}, \\ (\sigma^{(0)}_{y'x'})_{\sigma} &= -\frac{\mu b_{\sigma}^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(x' - x'_{\sigma,0})[3(y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2 + (x' - x'_{\sigma,0})^2]}{[(x' - x'_{\sigma,0})^2 + (y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2]^2}, \\ (\sigma^{(0)}_{y'y'})_{\sigma} &= \frac{\mu b_{\sigma}^e}{2\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{(y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))((y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2 - (x' - x'_{\sigma,0})^2)}{[(x' - x'_{\sigma,0})^2 + (y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2]^2}, \\ (\sigma^{(0)}_{zz})_{\sigma} &= -\frac{\mu b_{\sigma}^e \nu}{\pi(1-\nu)} \times \\ &\quad \times \frac{x' - x'_{\sigma,0}}{(x' - x'_{\sigma,0})^2 + (y' - f_{\sigma}^{(\sigma)}(x'_{\sigma,0}))^2}. \quad (27) \end{aligned}$$

Здесь b_{σ}^e – модуль вектора Бюргерса полной краевой дислокации.

В рамках решаемой задачи рассмотрим случай, когда плотности дислокаций всех рассматриваемых элементов системы постоянны и равны: на зеренных границах $\rho_b^{(k)} = C_1$, на двойниковых границах $\rho_{bw}^{(m)} = C_2$, на границах трещины $\rho_{\sigma} = C_3$. Границы рассматриваемых зерен принимаем прямолинейными, что наиболее полно соответствует равновесным условиям [7]. В таком случае в плоскости XOY зерно име-

ет форму правильного многоугольника, имеющего n границ и вписанного в окружность с радиусом R . Выбор расположения систем координат XYZ , $X'_k Y'_k Z'_k$ и $X'_\sigma Y'_\sigma Z'_\sigma$ представлен на рис. 2 и определен расположением рассматриваемого зерна и направлением векторов Бюргера дислокаций системы. В таком случае уравнения границ зерен представляем в следующем виде:

$$f_b^{(1)}(y_0) = 0, \quad (28)$$

$$f_b^{(2)}(x_0) = \frac{a}{2} - \frac{x_0}{\operatorname{tg}(\alpha_k)}, \quad (29)$$

$$f_b^{(k)}(x_0) = f_b^{(k-1)}(-a \cdot (\sin(\alpha_2) + \dots + \sin(\alpha_{k-1}))) - \frac{x_0 - a \cdot (\sin(\alpha_2) + \dots + \sin(\alpha_{k-1}))}{\operatorname{tg}(\alpha_k)}, \quad (30)$$

где a – длина зеренной границы, α_k – угол поворота k -ой зеренной границы относительно 1-ой. Данные параметры определяем следующим образом:

$$a = 2 \cdot R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}\right). \quad (31)$$

$$\alpha_k = -\left(\pi - \frac{\pi(n-2)}{n}\right)(k-1), \quad (32)$$

где R – радиус вписанной в зерно окружности; n – число граней у зерна.

Уравнения границ зерен в системе $X'_k Y'_k Z'_k$ определяем с помощью уравнений (13) – (18).

Форму двойника обуславливают формы его границ. В данной задаче принимаем их прямолинейными, а форму двойника – в виде равнобедренного треугольника (рис. 2) с шириной у устья H и длиной L . В плоскости XOY двойник описывается следующими формулами:

$$f_{nw}^{(1)}(x_0) = \frac{H}{2} \left(1 - \frac{x_0}{L}\right), \quad (33)$$

$$f_{nw}^{(2)}(x_0) = -\frac{H}{2} \left(1 - \frac{x_0}{L}\right). \quad (34)$$

Уравнения, описывающие рассматриваемую трещину в плоскости XOY , имеют вид:

$$f_\sigma(x_0) = w - \frac{x_0 - (r + L)}{\operatorname{tg}\alpha_\sigma}, \quad (35)$$

где l – длина трещины, α_σ – угол поворота трещины относительно оси OX ; r , w – параметры, определяющие расположение трещины относительно двойника (рис. 2).

Результаты расчетов и их обсуждение.

Расчеты были проведены для железа (Fe). При этом принималось: $b_b^e = b_b^s = 0,248$ нм; $b_\sigma^e = b_\sigma^s = 0,124$ нм [8]; $\mu = 81$ ГПа [9];

$\nu = 0,29$ [8]; $R = 70$ мкм; $n = 4, 5, 6, 7$; $H = 11$ мкм; $L = 90$ мкм; $l = 30$ мкм, $r = 10$ мкм, $w = 0$, $\alpha_\sigma = 0$.

Результаты расчетов полей напряжений рассматриваемой системы, расположенной в шестиугольном зерне (рис. 1, рис. 2), представлены на рис. 3. Для других вариантов (четырёх- и семиугольных зерен) поля напряжений имеют схожую конфигурацию.

Из рис. 3 видно, что концентраторами напряжений являются основные элементы системы: вершины зерен (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy}); двойниковые границы (σ_{xx} , σ_{zz} , σ_{xy}); вершина и устье двойника (σ_{yy} , σ_{xy}), а также вершины трещины (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy}).

Нормальные напряжения σ_{xx} максимальны на границах двойника и вблизи них. При этом верхняя граница испытывает сжимающие напряжения, а нижние – растягивающие. Аналогично, верхние вершины зерен характеризуются отрицательными значениями напряжений, а нижние – положительными. Напряжения σ_{xx} на берегах трещины также имеют высокие численные значения. При этом характер напряжений σ_{xx} на берегах трещины изменяется с растягивающих у вершины, расположенной вблизи вершины двойника, на сжимающие у противоположной вершины (рис. 3, а).

Напряжения σ_{yy} локализованы в узловых точках рассматриваемой системы (вершины зерен, двойника и трещины). При этом максимальные значения σ_{yy} соответствуют границе трещины. У вершины трещины, обращенной к двойнику, напряжения имеют положительный знак, а у противоположной вершины – отрицательный. В целом концентрация напряжений σ_{yy} за пределами зерна существенно ниже, чем в его пределах (рис. 3, б).

Максимальные значения нормальных напряжений σ_{zz} соответствуют вершинам зерен и границам двойника. При этом трещина не является концентратором напряжений σ_{zz} , однако она является границей перехода напряжений от растягивающих к сжимающим (рис. 3, в).

Напряжения σ_{xy} сконцентрированы в пределах рассматриваемого зерна. При этом максимальную концентрацию σ_{xy} можно отметить у вершины двойника и расположенной вблизи нее вершины трещины. У устья двойника напряжения являются отрицательными, а у вершины двойника и у границ трещины – положительными. Кроме того, имеются места локализации сжимающих напряжений σ_{xy} , обусловленные наличием трещины в зерне (рис. 3, г).

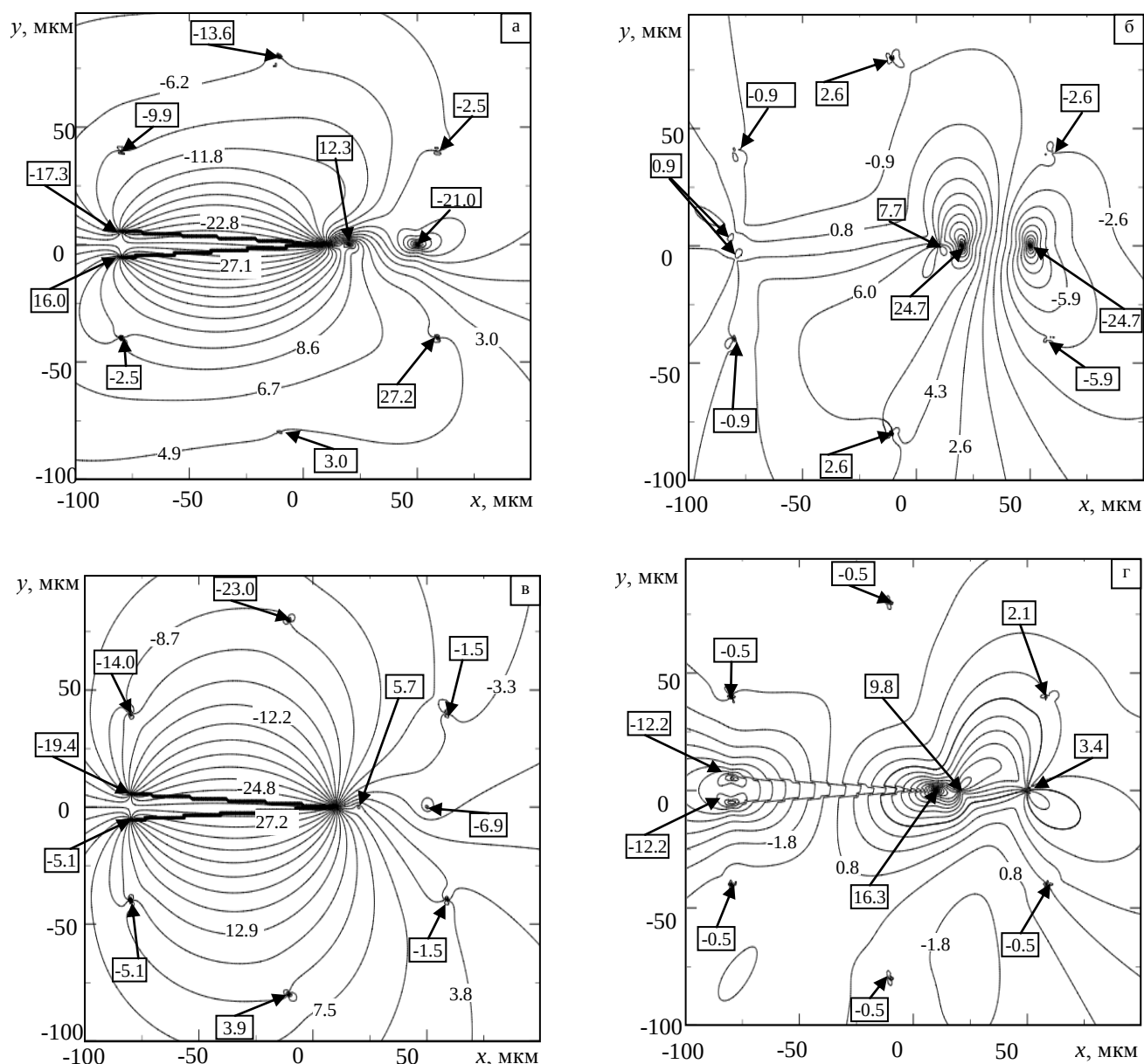


Рис. 3. Распределение напряжений в шестиугольном зерне поликристалла, обусловленных наличием в нем системы «двойник-трещина нормального отрыва»: а – $\sigma_{xx}(x,y)$; б – $\sigma_{yy}(x,y)$; в – $\sigma_{zz}(x,y)$; г – $\sigma_{xy}(x,y)$

Заключение. В результате проведенного исследования изучено напряженно-деформированное состояние в системе двойник-трещина нормального отрыва, находящейся в зерне поликристалла. Выявлены области концентрации растягивающих и сжимающих напряжений в зерне поликристалла в соответствии с предложенной дислокационной моделью рассматриваемой системы двойник-трещина нормального отрыва. Результаты расчетов компонент тензора напряжений свидетельствуют о возможности практического применения разработанного метода расчета напряженно-деформированного состояния в зерне

поликристалла, содержащем единичный клиновидный двойник и трещину нормального отрыва.

Литература

1. Финкель, В. М. Разрушение кристаллов при механическом двойниковании [Текст] / В.М. Финкель, В.А. Федоров, А.П. Королев. – Ростов н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 1990. – 171 с.
2. Зарождение микротрещин при двойниковании в ОЦК и ГЦК металлах [Текст] / В.А. Куранова, С.Н. Плужников, Ю.И. Тялин, В.А. Федоров // Вестник Тамбовского государственного университета. - 2001. - Т. 6. - Вып. 3. - С. 346 – 350.
3. Зарождение трещин на границе свободного упругого двойника [Текст] / В.А. Федоров, Ю.И. Тялин, С.Н. Плужников и др. // Вестник Тамбовского государственного

ного университета. – 2003. - Т. 8. - Вып. 4. - С. 726 – 728.

4. Астафьев, В.И. Нелинейная механика разрушения [Текст] / В.И. Астафьев, Ю.Н. Радаев, Л.В. Степанова. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2001. – 562 с.

5. Остриков, О.М. Механика двойникования твердых тел [Текст]: монография / О. М. Остриков. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008. – 301 с.

6. Остриков, О.М. Дислокационная макроскопическая модель клиновидного двойника [Текст] / О.М. Остри-

ков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2006. - № 2. – С. 10 – 18.

7. Хирт, Дж. Теория дислокаций [Текст] / Дж. Хирт, И. Лоте. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.

8. Полухин, П.И. Физические основы пластической деформации [Текст] / П.И. Полухин, С.С. Горелик, В.К. Воронцов. – М.: Metallurgy, 1982. – 584 с.

9. Киттель, Ч. Введение в физику твердого тела [Текст] / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1978. – 792 с.

Гомельский государственный университет имени П.О. Сухого

STRESS AND STRAIN STATES IN THE SYSTEM «TWIN-CRACK IN THE GRAINS OF THE POLYCRYSTAL»

T.V. Drobyshevskaya, O.M. Ostrikov

With the use of numerical and analytical methods for calculating studied the stress field generated by the distribution dislocation-dislocations in the system “twin-crack in the grains of the polycrystal”. Developed the method of calculation of the stress-strain state of the system

Key words: twinning dislocation model, fracture prediction

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ВНУТРЕННИХ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

С.Е. Савотченко

В статье рассматривается моделирование волновых явлений в несжимаемой жидкости внутри цилиндрической трубы с колеблющейся мембраной на одном конце. Показано, что под действием внешнего гармонического воздействия на мембрану в трубе за счет капиллярных сил возникают вынужденные внутренние волны, носящие квазипериодический затухающий характер. Приведено аналитическое решение, описывающее распределение давления жидкости в трубе

Ключевые слова: внутренние волны, вынужденные колебания, несжимаемая жидкость, уравнение Эйлера

Проблемы моделирования возбуждения возмущений давления в жидкости под действием внешних колебательных воздействий являются актуальными в связи с возможностью их применения для объяснения механизмов передачи и восприятия звука человеком и животными [1]. Интерес к такой задаче может быть объяснен большим комплексом проблем, затрагиваемых при построении моделей механизмов слуха, определяющих его частотноизбирательные свойства. Попытка учесть при математическом моделировании улитки органа слуха все особенности колебаний в ее структурах приводит к резкому усложнению описывающих их выражений [2]. Попытки количественно описать процесс преобразования звукового сигнала при его прохождении через механическую часть органа слуха сделаны несколькими исследователями (Сиберт, Фланаган и др), каждый из которых исходил из одних и тех же исходных экспериментальных данных, но делал отличные от других допущения и предположения при выводе соответствующих формул [1].

Целью данной работы является формулировка модели возбуждения волновых движений в заполненном жидкостью цилиндре, возникающих при вынужденных колебаниях мембраны, закрывающей один из концов цилиндра, приближенных волновым явлениям в улитке органа слуха. Основное внимание в данной работе уделяется пространственному распределению внутренних волн, возбуждаемых за счет капиллярных сил колеблющейся мембраной.

Рассмотрим заполненную идеальной несжимаемой жидкостью цилиндрическую трубу длины h с круговым сечением, постоянным вдоль всей ее длины. Направим ось Oz вдоль оси цилиндра. Пусть на одном конце в плоскости xOy при $z=0$ находится гибкая круглая мембрана

радиуса R , которая жестко закреплена по краям цилиндра, но может совершать поперечные колебания. Второй конец цилиндра ($z=h$) закрыт жесткой стенкой. Все стенки цилиндра и мембрана не пропускают жидкость.

Пусть на мембрану снаружи цилиндра действует внешнее давление, изменяющееся по гармоническому закону:

$$p_m(M_2, t) = p_m(M_2)e^{-i\omega t}, \quad (1)$$

где $p_m(M_2)$ – распределение внешнего давления по поверхности мембраны, ω – частота внешнего воздействия, t – время, M_2 – координаты точки на поверхности мембраны, то есть точки из области $D=\{(r, \theta): 0 \leq r \leq R, 0 \leq \theta \leq 2\pi\} \subset R^2$, r – полярный радиус, θ – полярный угол.

Будем считать, что распределение внешнего давления по поверхности мембраны является радиально симметричным, то есть не зависит от полярного угла. В этом случае вместо точки M_2 в формуле (1) достаточно писать полярный радиус r , то есть $p_m = p_m(r, t)$.

В силу радиальной симметрии внешнего распределения вектор скорости точек жидкости в цилиндре в отсутствие силы тяжести в цилиндрических координатах не будет иметь угловой компоненты, а радиальная и z -овая компоненты не будут содержать зависимости от θ . Поэтому вектор скорости будет записываться в виде $\mathbf{V}=(v_r, 0, v_z)$ и подчиняться уравнению Эйлера [3,4]

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\frac{\nabla p}{\rho}, \quad (2)$$

где $p(M, t)$ – давление в жидкости в точке $M(r, z) \in B = \{(r, z): 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq h\}$ в момент времени t , ρ – плотность жидкости (постоянная величина), ∇ – градиент. В (2) пренебрегли квадратичным членом $(\mathbf{V}, \nabla)\mathbf{V}$ в силу его малости.

В цилиндрических координатах из (2) по компонентам получаем уравнения:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad \frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (3)$$

В силу того, что внешнее воздействие изменяется по гармоническому закону (1), будем искать стационарные решения уравнений (3) в виде аналогичных гармонических зависимостей:

$$\mathbf{V}(M, t) = \mathbf{V}(M)e^{-i\omega t}, \quad p(M, t) = p(M)e^{-i\omega t}. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (3) приводит к уравнениям:

$$i\omega v_r = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad i\omega v_z = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (5)$$

Уравнение непрерывности для идеальной несжимаемой жидкости $\text{div } \mathbf{V} = 0$ в цилиндрических координатах при сделанных предположениях будет иметь вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

Выразив компоненты скорости из (5) и подставив их в (6), можно получить уравнение Лапласа для определения давления:

$$\Delta p = 0, \quad (7)$$

где $\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа

в цилиндрических координатах (с учетом отсутствия зависимости от θ).

На неподвижных стенках цилиндра должны выполняться условия обтекания:

$$v_r|_{r=R} = 0, \quad v_z|_{z=h} = 0. \quad (8)$$

Подстановка (8) компонент скорости, выраженных из (5), приводит к краевым условиям для давления на неподвижных стенках цилиндра:

$$\frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0. \quad (9)$$

Будем считать, что на подвижной границе при $z=0$ выполняется условие Лапласа, связывающее давление в жидкости p с внешним давлением p_m и поверхностным натяжением мембрана-жидкость с коэффициентом σ :

$$p - p_m = -\sigma \Delta_2 \zeta(M_2, t), \quad (10)$$

Δ_2 – двумерный оператор Лапласа, $\zeta(M_2, t)$ – закон движения мембраны. Таким образом, внешнее воздействие на мембрану за счет поверхностного натяжения, то есть капиллярных сил, передает колебания внутрь жидкости и возбуждает волны, что и отличает их от гравитационных внутренних волн [3,4] и волн в открытых водоемах [5].

Для малых колебаний справедливо соотношение $v_z|_{z=0} = \zeta(M_2, t)$. Продифференцировав

(10) по t с учетом последнего соотношения, можно получить:

$$\frac{\partial p}{\partial t} \Big|_{z=0} - \frac{\partial p_m}{\partial t} = -\sigma \Delta_2 v_z|_{z=0}. \quad (11)$$

Подстановка в (11) зависимости (4) и z -вой компоненты скорости из (5) приводит к граничному условию на подвижной границе:

$$\left(\frac{\sigma}{\rho \omega^2} \frac{\partial p}{\partial z} + p \right) \Big|_{z=0} = p_m(r). \quad (12)$$

Таким образом, математическая постановка предлагаемой модели сводится к краевой задаче для уравнения Лапласа (7) при условиях (9) и (11).

Для нахождения решения краевой задачи (13) в явном аналитическом виде можно воспользоваться методом Фурье. Решение задачи (13) ищется в виде

$$p(r, z) = u(r, z) + p_m(r), \quad (13)$$

где новая искомая функция $u(r, z)$ имеет смысл изменения давления в жидкости за счет внешнего возмущения. Тогда для нахождения $u(r, z)$ получается краевая задача:

$$\begin{cases} \Delta_r u + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\Delta_r p_m, & 0 < r < R, \quad 0 < z < h; \\ \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R} = -\frac{\partial p_m}{\partial r} \Big|_{r=R}, & 0 < z < h; \\ \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0, & 0 < r < R; \\ \left(\frac{\sigma}{\rho \omega^2} \frac{\partial u}{\partial z} + u \right) \Big|_{z=0} = 0, & 0 < r < R, \end{cases} \quad (14)$$

где $\Delta_r = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right)$ – радиальная часть оператора Лапласа.

Согласно методу Фурье, решение краевой задачи (14) представимо в виде разложения в ряд по полной системе функций $\{u_n(z)\}$:

$$u(r, z) = \sum_n \psi_n(r) u_n(z), \quad (15)$$

где $\psi_n(r)$ – коэффициенты Фурье.

Полная система функций $\{u_n(z)\}$ состоит из собственных функций задачи Штурма-Лиувилля:

$$\begin{cases} u_n''(z) + \lambda_n u_n(z) = 0, & 0 < z < h, \\ \sigma u_n'(0) + \rho \omega^2 u_n(0) = 0, \\ u_n'(h) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Собственные функции задачи Штурма-Лиувилля (16) имеют вид [6]:

$$u_n(z) = \cos \sqrt{\lambda_n} (h - z), \quad (17)$$

собственные значения $\lambda_n = (\mu_n / h)^2$, где μ_n – корни уравнения

$$\mu_n \operatorname{tg} \mu_n = -\frac{\rho h \omega^2}{\sigma}.$$

Подстановка ряда (15) в (14) с использованием (17), приводит к краевой задаче для определения коэффициентов Фурье:

$$\begin{cases} \Delta_r \psi_n(r) - \lambda_n \psi_n(r) = f_n(r), & 0 < r < R, \\ \left. \frac{\partial \psi_n(r)}{\partial r} \right|_{r=R} = F_n(R), & 0 < z < h, \end{cases} \quad (18)$$

где обозначено

$$F_n(R) = -a_n(\omega) \left. \frac{\partial p_m}{\partial r} \right|_{r=R},$$

$$f_n(r) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \{r F_n(r)\} = -a_n(\omega) \Delta_r p_m(r),$$

$$a_n(\omega) = \frac{2\rho h \omega^2 \sqrt{\rho^2 h^2 \omega^4 + \mu_n^2 \sigma^2}}{\mu_n \{\rho h \omega^2 (\rho h \omega^2 - \sigma) + \mu_n^2 \sigma^2\}}.$$

Решение краевой задачи (18) имеет вид:

$$\begin{aligned} \psi_n(r) = & \left\{ \frac{F_n(R) + I_0(\mu_n R/h) K_0(\mu_n R/h) f_n(R) R h}{\mu_n I_1(\mu_n R/h)} + \right. \\ & \left. + \int_r^R K_0(\mu_n r/h) f_n(r) r dr \right\} I_0(\mu_n r/h), \end{aligned} \quad (19)$$

где I_0 , I_1 – функции Инфельда нулевого и первого порядков соответственно, K_0 – функция Макдональда нулевого порядка.

Подстановка (17) и (19) в (15), а затем в (13) приводит к решению поставленной задачи:

$$\begin{aligned} p(r, z) = & p_m(r) - \\ & - h \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{p'_m(R) + R I_0(\mu_n R/h) K_0(\mu_n R/h) \Delta_r \{p_m(R)\}}{\mu_n I_1(\mu_n R/h)} + \right. \\ & \left. + \int_r^R K_0\left(\frac{\mu_n r}{h}\right) \Delta_r \{p_m(r)\} r dr \right\} \times \\ & \times a_n(\omega) I_0\left(\frac{\mu_n r}{h}\right) \cos \frac{\mu_n (h - z)}{h}. \end{aligned} \quad (20)$$

Выражение (20) описывает распределение давления жидкости в цилиндре, возбуждаемое внешним воздействием на мембрану, задаваемое произвольной функцией с радиальной симметрией.

Было проведено численное моделирование для случаев различного вида внешних воздействий на мембрану. Далее приведены графики изменения давления в жидкости за счет внешнего возмущения $u(r, z) = p(r, z) - p_m(r)$ на расстоя-

ние трети радиуса мембраны от начала оси цилиндра $r = R/3$: $u(z) = u(R/3, z)$.

Выбирались фиксированные значения параметров, ориентированные на упрощенную модель улитки внутреннего уха человека [1]: плотность жидкости $\rho = 1002 \text{ кг/м}^3$, радиус мембраны $R = 1.15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, длина цилиндрической трубы $h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Варьировались такие параметры, как частота внешнего гармонического воздействия на мембрану, коэффициент поверхностного натяжения мембрана-жидкость. Значение частоты внешнего воздействия считается лежащим внутри диапазона частот, воспринимаемых человеческим ухом от 50 Гц до 20 кГц. Выбирались различные профили распределения внешнего давления на мембрану. Здесь приведены три модельных вида радиальных распределений:

$$p_m(r) = p_0 \exp(-r/r_0), \quad (21)$$

$$p_m(r) = p_0 \exp\{-(r/r_0)^2\}, \quad (22)$$

$$p_m(r) = p_0 J_0(r/r_0), \quad (23)$$

где p_0 и r_0 – модельные параметры.

Ряд в (20) достаточно быстро сходится, что позволяет удерживать порядка $n=250$ слагаемых, достаточных для удовлетворительной аппроксимации ряда конечной суммой.

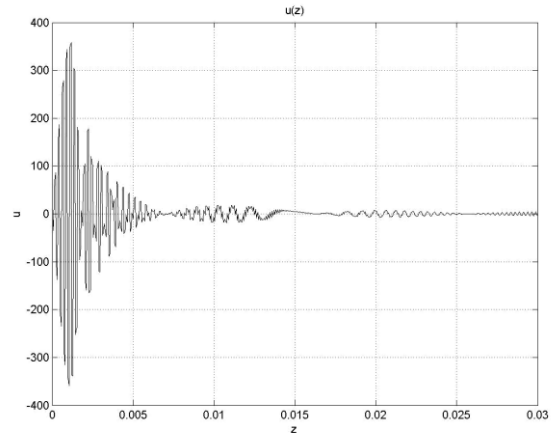


Рис. 1. Распределение $u(z)$ при распределении внешнего давления по поверхности мембраны вида (21) с параметрами $p_0=0.01 \text{ м}$, $r_0=5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, $\omega=5 \text{ кГц}$

Результаты моделирования показали, что возбуждение представляется в виде нескольких сгруппированных мод, формирующих сигналы. Моды с наибольшими амплитудами формируют основной сигнал. Амплитуды огибающих следующих сигналов существенно ниже основного. Основной сигнал расположен всегда вблизи к колеблющейся мембране (в начале оси z), независимо от вводимых параметров. Затем амплитуда сигнала осциллирует, затухая при удалении от мембраны.

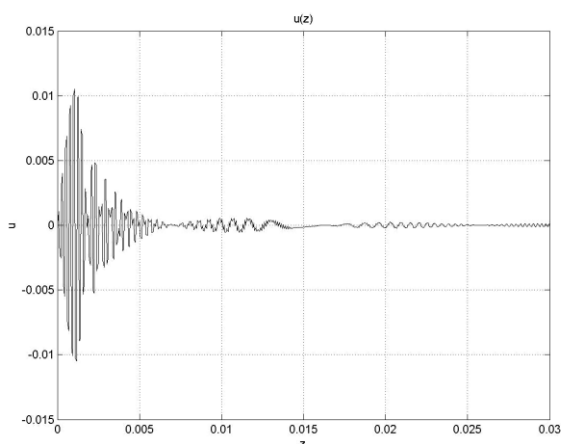


Рис. 2. Распределение $u(z)$ при распределении внешнего давления по поверхности мембраны вида (22) с параметрами $p_0=0.01$ м, $r_0^2=5 \cdot 10^{-4}$ м, $\omega=5$ кГц

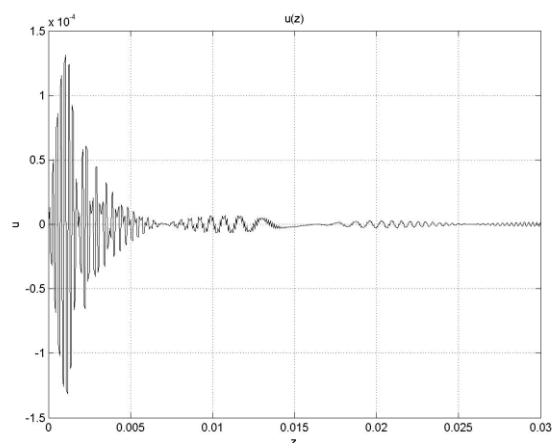


Рис. 3. Распределение $u(z)$ при распределении внешнего давления по поверхности мембраны вида (23) с параметрами $p_0=1$ м, $r_0=1$ м, $\omega=5$ кГц

Изменение распределения внешнего давления по поверхности мембраны $p_m(r)$ влияет на амплитуду возбуждаемого сигнала, при этом

профиль бегущей волны практически не меняется. Так, при распределении вида (21) амплитуда довольно высока (рис. 1), что свидетельствует о том, что порождается сравнительно сильный сигнал. Если же в качестве распределения внешнего давления берутся функции вида (22) и (23), то амплитуда волн мала, т.е. эти функции порождают довольно слабый сигнал (рис. 2 и 3).

Значения коэффициента поверхностного натяжения мембрана-жидкость слабо влияет на изменение структуры сигнала.

При изменении частоты внешнего воздействия профиль основного сигнала не сдвигается. Увеличение ω с 5 кГц на 10 кГц приводит к изменению амплитуды огибающей основного сигнала: она уменьшается более чем в 2 раза для одного и того же вида распределения внешнего давления.

Литература

1. Молчанов, А.П. Электрические модели улитки органа слуха [Текст] / А.П. Молчанов, Л.Н. Бабкина. - Л.: Наука, 1978. - 181 с.
2. Варин, В.П. Математическая модель слуховой улитки человека [Текст] / В.П. Варин, А.Г. Петров // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. - 2008. - № 96. - 26 с. [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2008-96>.
3. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Гидродинамика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - М.: Наука, 1986. - Т. VI. - 736 с.
4. Биркгоф, Г. Гидродинамика [Текст] / Г. Биркгоф. - М.: Изд-во иностр. лит., 1963. - 244 с.
5. Савотченко, С.Е. Вынужденные капиллярные волны в покрытом тонкой пленкой бассейне [Текст] / С.Е. Савотченко // Известия вузов. Сер. Физика. - 2008. - Т. 51. - № 3. - С. 3-6.
6. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики [Текст] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. - М.: Изд-во МГУ, 1999. - 798 с.

Белгородский юридический институт МВД России

THE MODELING OF THE FORCED INTERNAL CAPILLARY WAVES

S.E. Savotchenko

The article is devoted to the problem of the modeling of the wave phenomena in incompressible liquid inside the circular tube with vibrating membrane at one edge. It is shown that under the effect of the external harmonic action on the membrane there can appear forced internal capillary waves in the tube of quasi-periodic fading manner. Analytical solution, describing the distribution of liquid pressure in the tube is derived

Key words: inner waves, forced vibrations, incompressible liquid, Euler equation

ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКОГО ПРЯМОГО РЕБРА НА ТЕПЛОПЕРЕДАЧУ

А.А. Пригожин, И.С. Аношин, С.В. Дахин

Рассматривается возможность применения рельефных рёбер для интенсификации теплопередачи в газовых (воздушных) теплообменниках. Профилирование поверхности происходило путём устройства трёхмерных углублений различной геометрии (TLJT-поверхность). При этом моделировалось два варианта течения воздуха в пакете рёбер: с открытыми и закрытыми боковыми гранями

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

Актуальность уменьшения эксплуатационных затрат и габаритно-массовых характеристик теплообменных аппаратов (особенно газогазовых и газожидкостных) очевидна. Эта задача может быть решена только путём интенсификации теплообмена при неизменном или, как максимум, умеренном росте гидродинамического сопротивления. Сложность задачи состоит в необходимости разрешения противоречия: интенсивность теплообмена возрастает пропорционально скорости теплоносителя примерно в первой степени, т.е. $\sim W$, а затраченная на его прокачку мощность $\sim W^3$. При этом перенос теплоты и количества движения осуществляется одними и теми же теплоносителями, омывающими одну и ту же поверхность теплообмена. Безусловно, данная проблема очень сложна и может быть решена только за счёт искусственного создания специальных условий для процессов теплообмена.

Одним из таких специальных условий, на наш взгляд, может являться применение технологии, основанной на использовании смерчеобразных струй (TLJT) [1]. При этом используется явление самоорганизации вторичных смерчеобразных вихрей – закрученных струй при обтекании ими трёхмерных углублений на граничных поверхностях. Соответствующий подбор профиля углублений и режима обтекания поверхности позволяет интенсифицировать теплообмен без дополнительных затрат на прокачку теплоносителя.

В данной работе исследуется возможность применения TLJT-поверхностей и подобных им при оребрении теплообменных трубок, необходимость которого обусловлена практическим

отсутствием работ как экспериментальных, так и теоретических по данной тематике.

Моделирование работы рёбер проводилось медными пластинами габаритными размерами $90 \times 70 \times 1$ мм с нанесёнными различным способом лунками. В пластинах имеются три отверстия для теплообменных трубок, расположенных по вершинам равностороннего треугольника, имитирующих шахматный пучок труб.

В каждом численном эксперименте рассматривался канал, состоящий из трёх пластин одного типа, расположенных друг над другом на расстоянии 4 мм, и обдуваемый с одной стороны потоком воздуха постоянной скорости. Воздушное пространство вокруг пластин ограничивалось размерами $130 \times 70 \times 14$ мм. Для возможности сравнения и последующей оценки эффективности олунения рассматривались "эталонные" гладкие пластины. Геометрия и внешний вид модельных пластин приведены на рис. 1 – 5.

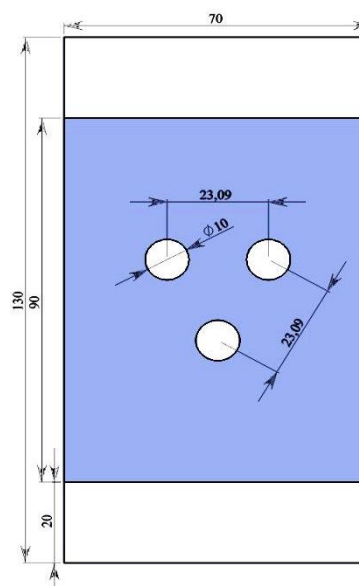


Рис. 1. Геометрия пластин и воздушного пространства

Для всех моделей шахматное расположение и шаг лунок ($s = 16$ мм) не менялись.

Пригожин Антон Александрович – ВГТУ, лаборант-исследователь, тел. (473) 234-61-08
Аношин Игорь Сергеевич – ООО "РЕСУРС", инженер-конструктор, ВГТУ, магистрант, тел. (473) 280-20-16
Дахин Сергей Викторович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (473) 243-76-62, e-mail: svdakhin@ya.ru

Задача решалась в программном комплексе ANSYS CFX в рамках SST-модели, выбор

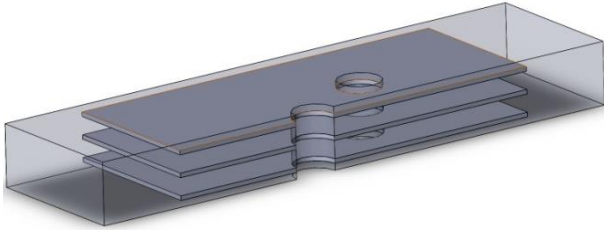
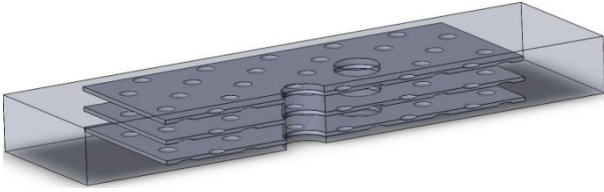
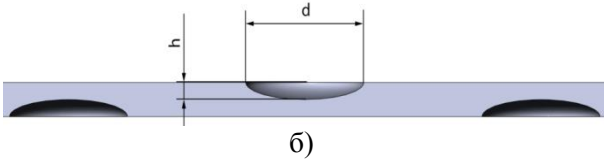


Рис. 2. Геометрия эталонной модели

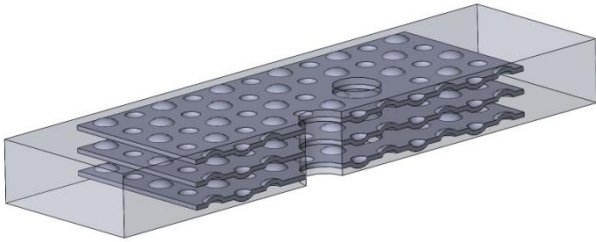


а)

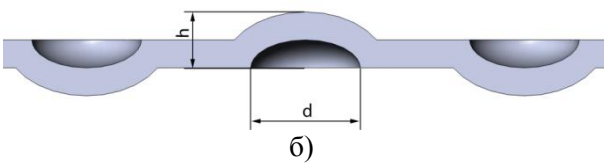


б)

Рис. 3. Геометрия модели с лунками-углублениями, $h/d=1/8$

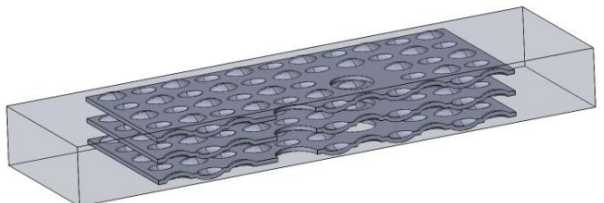


а)

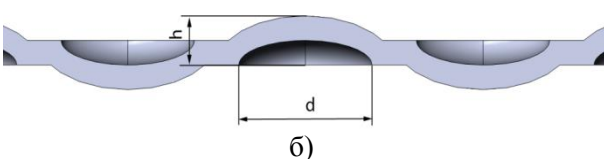


б)

Рис. 4. Геометрия модели со сферическими лунками, $h/d=1/2$



а)



б)

Рис. 5. Геометрия модели с эллиптическими лунками, $h/d=1/3$

которой обусловлен тем, что она является комбинацией $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ моделей турбулентности, благодаря чему достаточно хорошо реализуются пристеночные и свободные течения вдали от стенок.

Для моделирования процессов гидродинамики и тепломассообмена, в общем случае, требуется решить систему четырёх независимых уравнений:

1. Сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0. \quad (1)$$

2. Сохранения импульса

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{S}_M, \quad (2)$$

где $\vec{\tau}$ - тензор напряжений

$$\vec{\tau} = \mu \left[\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{V} \right].$$

3. Сохранения энергии

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\tau}) + \vec{V} \cdot \vec{S}_M + S_E, \quad (3)$$

где $h_{tot} = h_{stat} + \vec{V}^2/2$; $h_{stat} = h_{stat}(T, p)$.

4. Состояния $\rho = \rho(T, p)$. (4)

Здесь приняты следующие обозначения: p – давление; ρ – плотность; V – скорость; T – температура; t – время; h_{tot} – полная энтальпия; h_{stat} – статическая энтальпия; S_M – источниковый член для импульса; S_E – источниковый член для энергии; μ – коэффициент динамической вязкости; λ – коэффициент теплопроводности; δ – дельта-функция Кронекера.

Система (1) – (4) дополняется уравнениями для выбранной модели турбулентности:

$$\mu_t = \rho \frac{0.31k}{\max[0.31\omega, F_2 F_3 S]}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \tilde{P}_k - \rho \beta^* k \omega; \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla(\rho V\omega) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) + \rho\alpha G - F_4 \rho \omega^2 + D_\omega. \quad (7)$$

Здесь:

$$\tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta_\omega^* \rho k \omega); P_k = \mu_\tau G; \quad (8)$$

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega; \quad (9)$$

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4); F_2 = \tanh(\Phi_2^2); \quad (10)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta_\omega^* \omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega,2} \rho k}{D_\omega^+ y^2} \right]; \quad (11)$$

$$\Phi_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta_\omega^* \omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right); \quad (12)$$

$$D_\omega^+ = \max \left[2\sigma_{\omega,2} \rho \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10} \right]; \quad (13)$$

$$F_3 = 1 - \tanh \left[\left(\frac{150\mu}{\rho y^2 \omega} \right)^4 \right]; F_4 = \frac{1}{1 + 3,6 Ri}; \quad (14)$$

$$Ri = \frac{\Omega}{S} \left(\frac{\Omega}{S} - 1 \right); \quad (15)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 \sigma_{k,1} + (1 - F_1) \sigma_{k,2}}; \quad (16)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) \sigma_{\omega,2}}; \quad (17)$$

$$\alpha = F_1 \frac{5}{9} + (1 - F_1) 0,44; \quad (18)$$

$$\beta^* = \beta_\omega^* (1 + \zeta^* F(M_t)); \quad (19)$$

$$\beta = 0,075 F_1 + 0,0828 (1 - F_1) - \beta_\omega^* \zeta^* F(M_t); \quad (20)$$

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases}; M_t^2 = \frac{2k}{a^2}; \quad (21)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} S_{k1} S_{k2}}; S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}; \quad (22)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \Omega_{k1} \Omega_{k2}}; \Omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}; \quad (23)$$

$$G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}; D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot V + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}; \quad (24)$$

$$\sigma_{k,1} = 0,85; \sigma_{k,2} = 1; \sigma_{\omega,1} = 0,5; \sigma_{\omega,2} = 0,856; \beta_\omega^* = 0,09; \zeta^* = 1,5; M_{t0} = 0,25.$$

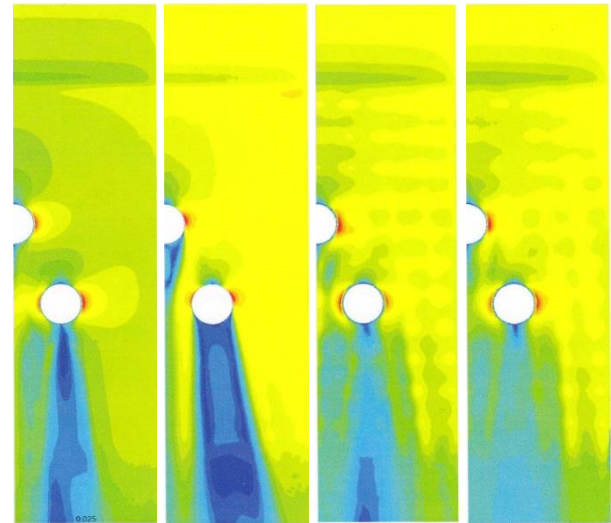
В (5) – (24) обозначено: k – турбулентная энергия; y – расстояние до ближайшей стенки; ω – удельная скорость диссипации турбулентной энергии.

Для ускорения расчётов и сокращения потребных вычислительных ресурсов модель разбивается на две части в плоскости вертикальной симметрии.

Граничные условия для всех моделей приняты следующими: температура набегающего воздуха $T_{жс} = 300$ К; со стороны теплообменных трубок задано условие первого рода с $T_{тр} = 400$ 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. 6 и 7 представлены результаты расчёта поля скоростей воздушного потока между пластинами.



а) б) в) г)

Рис. 6. Поле скоростей между пластинами для "открытой" модели:

а) "эталонная" модель; б) модель с лунками-углублениями; в) модель со сферическими лунками; г) модель с эллиптическими лунками

Анализ решения показывает, что для всех моделей с лунками, по сравнению с "эталонной", наблюдается увеличение скорости обтекания поверхности пластины за счёт образова-

ния закрученных струй. Причём для модели с лунками-углублениями поле скоростей более равномерно, чем у других моделей. Но в следе за трубным пучком для пластины с лунками-углублениями наблюдается максимальное снижение скорости воздуха из всех расчётных вариантов, включая "эталонный". На наш взгляд, это можно объяснить недостаточным динамическим воздействием для вихреобразования с одновременным увеличением аэродинамического сопротивления профилированной лунками-углублениями поверхности. В силу чего происходит увеличение расхода воздуха через боковые грани. Это иллюстрирует и смещение следа за препятствием вправо – в сторону открытых боковых граней. Для других моделей с лунками след за трубным пучком размывается, и наибольшая скорость в следе наблюдается у модели с эллиптическими лунками.

Таким образом, можно заключить, что модель с эллиптическими лунками предпочтительна с точки зрения гидродинамической обстановки. Поэтому для расчётов по "закрытой" модели ограничимся двумя случаями: "эталонной" и пластиной с эллиптическими лунками.

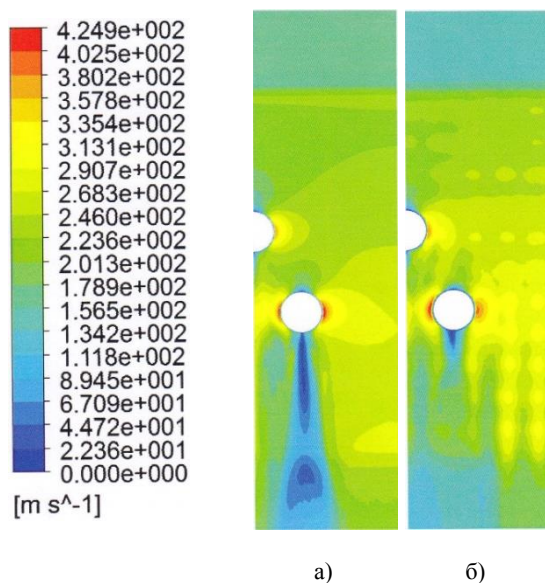


Рис. 7. Поле скоростей между пластинами для "закрытой" модели:

а) "эталонная" модель; б) модель с эллиптическими лунками

"Закрытая" модель характеризуется увеличением неравномерности поля скоростей и более существенным размыванием следа за трубным пучком за счёт увеличения расхода воздуха через канал.

Оценка эффективности исследуемых пластин осуществлялась по температуре ребра центральной пластины "за потоком", т.е. анализировалась температура от центра пластины и

далее по потоку воздуха. Контрольные точки расположены по оси симметрии пластины на расстояниях x от линии, соединяющей центры задних трубок: 0; 8,75; 17,5; 26,25; 35 мм. Результаты представлены на рис. 8 в безразмерных координатах $\Theta = f(X)$, а также на рис. 9. Здесь

$$\Theta = \frac{T_x - T_{ж}}{T_0 - T_{ж}}, \quad X = \frac{x}{l},$$

где Θ – безразмерная избыточная температура; X – безразмерная координата; $T_x, T_{ж}, T_0$ – текущая температура пластины, температура воздуха, температура пластины в точке $x = 0$ мм соответственно, К; $l = 35$ мм – условная длина ребра.

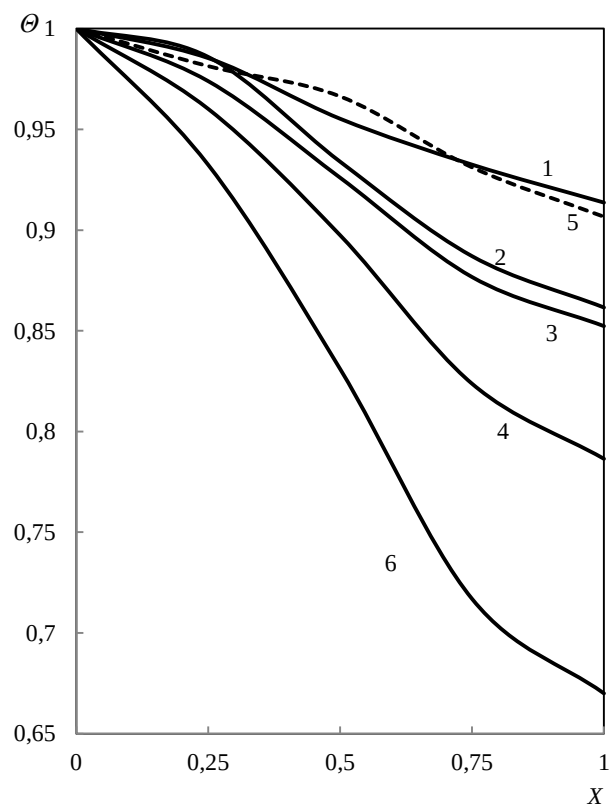


Рис. 8. Профиль температуры по длине ребра: 1–4 – "открытая" модель; 5–6 – "закрытая" модель; 1, 5 – "эталонная" модель; 2 – модель с лунками-углублениями; 3 – модель со сферическими лунками; 4, 6 – модель с эллиптическими лунками

"Эталонные" рёбра для "открытой" и "закрытой" моделей показывают практически одинаковые результаты, несмотря на увеличение скорости воздуха. Для рёбер с лунками наблюдается снижение их температуры, причём вариант с эллиптическими лунками даёт максимальный результат для обеих рассматриваемых моделей.

Нанесение углублений на поверхность ребра увеличивает площадь теплообмена, что са-

мо по себе приводит к увеличению эффективности его работы [2, 3]. К тому же образование смерчеобразных струй и отрывных течений на олуённых поверхностях сопровождается интенсификацией теплообмена по сравнению с гладкими поверхностями. При этом, однако, растут и гидродинамические потери. Изменение средней относительной температуры рёбер и относительного перепада давления в зависимости от модели проиллюстрировано на рис. 9. Здесь T_{cp} – отношение средней температуры текущего и "эталонного" рёбер, а ΔP – отношение текущего перепада давления в канале к "эталонному", номера моделей как на рис. 8.

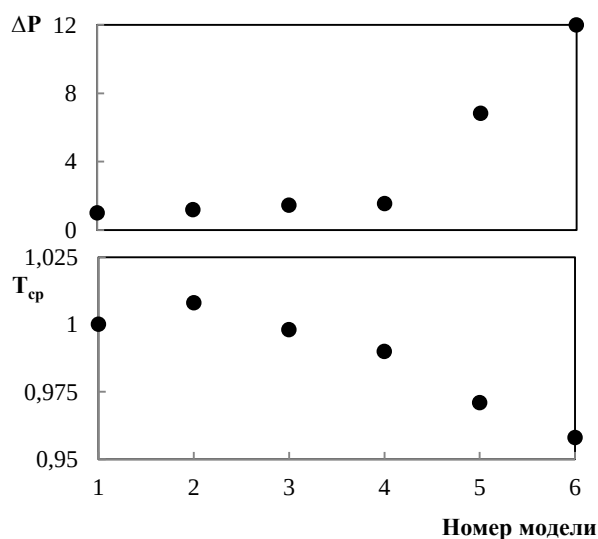


Рис. 9. Изменение средней относительной температуры рёбер и относительного перепада давления в зависимости от модели

В результате анализа полученных данных можно сделать следующие выводы об эффективности рассматриваемых решений.

Для случая "открытой" модели установлено, что для ребра с эллиптическими лунками средняя температура по контрольному ребру на 3,15 °С ниже, чем у "эталонной", а для торца ребра на 4,64 °С, средняя температура для ребра со сферическими лунками на 0,61 °С, для торца ребра на 1,72 °С ниже "эталонной". Вариант ребра с лунками-углублениями не показал ожидаемого результата, хотя распределение

температуры вдоль контрольного ребра аналогично распределению в остальных моделях. Одной из причин отсутствия эффекта может быть неоптимальное соотношение параметров потока и геометрии лунок. Что касается гидродинамического сопротивления канала, образованного рёбрами, то наиболее эффективная с точки зрения теплообмена модель с эллиптическими лунками имеет наибольший перепад давления, который в 1,54 раза выше, чем у модели с плоской пластиной.

Для случая "закрытой" модели средняя температура по контрольному ребру на 4,04 °С, а для торца ребра на 6,65 °С ниже, чем у "эталонной". Перепад давления в 1,76 раза выше, чем у модели с плоской пластиной (в 12 раз выше, чем у плоской пластины для "открытой" модели).

Сравнение результатов "открытой" и "закрытой" моделей показывает, что средняя температура контрольного ребра "закрытой" модели ниже примерно на 10 °С, что говорит о лучшей теплоотдаче в рассматриваемых условиях.

Таким образом, организация лунок различной формы на теплообменных рёбрах оправдана, а при оптимальных соотношениях гидродинамика-геометрия может дать существенные результаты по интенсификации теплопередачи.

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

Литература

1. Кикнадзе, Г.И. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление [Текст] / Г.И. Кикнадзе, И.А. Гачечиладзе, В.В. Алексеев. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 84 с.
2. Дахин, С.В. Влияние рельефа поверхности тонкого прямого ребра на изменение его температуры [Текст] / С.В. Дахин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, № 3. – С. 68-70.
3. Дахин, С. В. Экспериментальное исследование температурного поля плоской профилированной пластины [Текст] / С.В. Дахин, Н.А. Палихов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 7.1. – С. 98-101.

Воронежский государственный технический университет
ООО "РЕСУРС", г. Воронеж

INFLUENCE SURFACE PROFILE FLAT STRAIGHT EDGE ON THE HEAT TRANSFER

A.A. Prigozhin, I.S. Anoshin, S.V. Dakhin

The possibility of using embossed edges for intensification of heat transfer in gas (air) heat exchangers. Surface profiling occurs through three-dimensional device recesses of different geometry (TLJT-surface). In this simulated two options of air flow in the package edges: open and closed side faces. The work is done in the execution of public tasks in the field of scientific activity

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

ИМИТАЦИОННОЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В БЕЗЛОПАТОЧНОМ НАПРАВЛЯЮЩЕМ АППАРАТЕ МАЛОРАЗМЕРНОЙ ОСЕВОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Д.В. Боровков, Ю.В. Демьяненко

В данной статье приведены результаты численного исследования пространственной структуры течения газа в безлопаточном направляющем аппарате малоразмерной осевой газовой турбины турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя. Методами вычислительной гидрогазодинамики получены интегральные значения и распределение основных характеристик безлопаточного направляющего аппарата – угла и скорости потока на выходе, проведено сравнение с расчетом по инженерной методике и с экспериментальными данными

Ключевые слова: безлопаточный направляющий аппарат, осевая турбина, ANSYS CFX

Введение

В статье 2001 г. [1] рассмотрены преимущества и недостатки безлопаточных направляющих аппаратов (БлНА), применяемых в турбинах турбонасосных агрегатов (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Изложен опыт применения в конструкторском бюро химавтоматики (КБХА) БлНА в турбинах, работающих на окислительном газе. Приведены основные параметры турбин с БлНА, разработанных в КБХА. Среди присущих БлНА недостатков названо отсутствие надежных инженерных методик расчета и профилирования БлНА, приводящее в отдельных случаях к тому, что действительный расход газа через турбину заметно отличается (в большую или меньшую сторону) от расчетного значения.

Развитие вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и компьютерных технологий позволяет устранить указанный недостаток. Современные программные CFD комплексы (в частности ANSYS CFX, применяемый для CFD расчетов в КБХА) предоставляют возможность выполнять при проектировании и анализе существующих конструкций значительно больший объем расчетов. Решение пространственной задачи течения газа в БлНА позволяет получать не только интегральные, но и локальные значения параметров проточной части, моделировать рабочие процессы с большей точностью, чем при использовании традиционных расчетных методик [2]. Полученное в результате пространственного CFD расчета распределение параметров потока в БлНА позволяет оценить совершенство его проектирования, выявить слабые места рассматриваемой конструкции и определить мероприятия для устранения недостатков и, следовательно, улучшения характеристик турбины.

Цель моделирования

Цель данного имитационного моделирования – получение методом CFD интегральных значений и распределения основных характеристик БлНА – угла потока α_l и скорости потока на выходе C_l , валидация и верификация расчетной модели БлНА, выводы о применимости выбранного инструмента (ANSYS CFX) для решения данной конкретной задачи.

Геометрическая модель расчетной области

Рассматриваемый БлНА является частью корпуса турбины ТНА, выполненного заодно с корпусом насоса.

По рабочим чертежам в среде SolidWorks создана пространственная модель корпуса турбины ТНА. Общий вид модели представлен на рис. 1, разрез – на рис. 2.

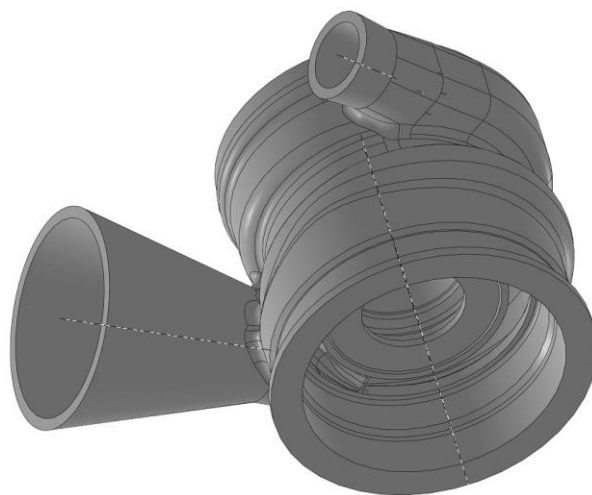


Рис. 1. Пространственная геометрическая модель корпуса (вид со стороны БлНА)

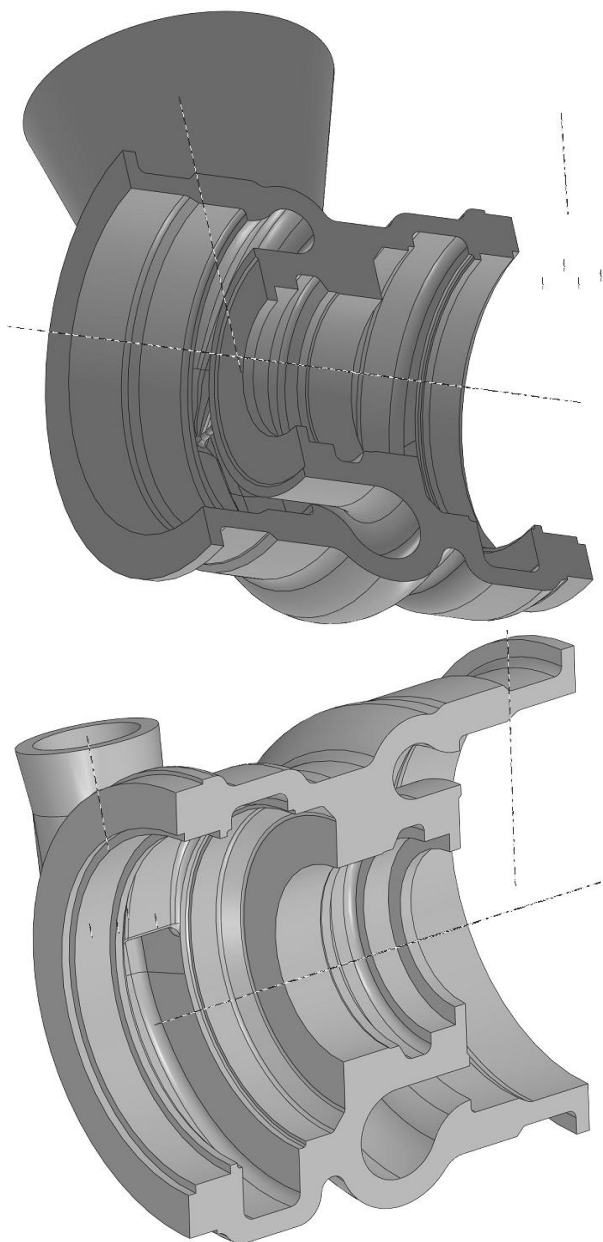


Рис. 2. Пространственная геометрическая модель корпуса (разрез)

При построении таких сложных моделей целесообразно пользоваться не твердотельными, а поверхностными инструментами. После построения и доработки всех поверхностей осуществляется сшивка их в твердое тело. Желательно, чтобы меридиональные сечения БлНА состояли из одинакового количества кривых. Это необходимо для построения качественной расчетной сетки и во избежание при генерации проблем, связанных с вырождающимися поверхностями. Дополнительное разбиение каждого сечения БлНА на равное число линий позволяет получить четырехугольные поверхности без острых, стремящихся к нулю, углов. Для удовлетворительного по качеству описания геометрии конфузора и других элементов с переменными сечениями в окружном направлении необходимо построение направляющих кривых (рис. 3).

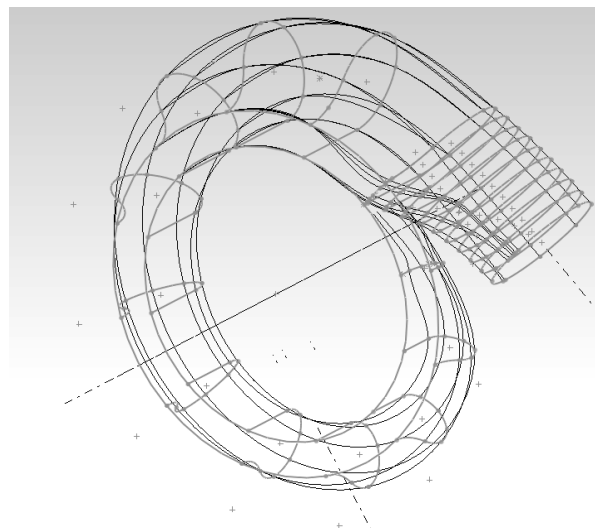


Рис. 3. Сечения и направляющие кривые для построения геометрии БлНА

На основе пространственной модели корпуса построена расчетная область БлНА.

Расчетная область БлНА (рис. 4) содержит следующие элементы: подводящий конфузурный участок круглого сечения 1, заканчивающийся «горлом» 2; переходный участок 3 между «горлом» 2 и начальным сечением спиральной камеры 4; «язык» 5, образованный стенкой между переходным участком 3 и окончанием спиральной камеры переменного сечения 6, подающей газ в выходную кольцевую щель 7; выходной кольцевой участок 8 с толщиной кольца, превышающей высоту выходной кольцевой щели примерно в 2 раза.

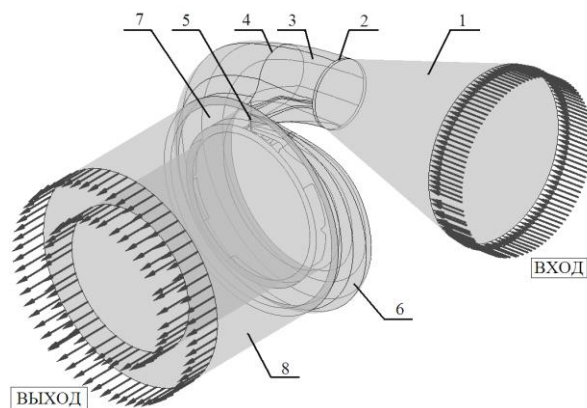


Рис. 4. Расчетная область БлНА

Выходной кольцевой участок, имеющий длину, превышающую толщину кольца в 10 раз, добавлен в расчетную область для улучшения сходимости итерационного процесса решения и служит для выравнивания полей давления и скоростей потока в выходном сечении расчетной области. Отсутствие указанного участка приведет к появлению значительных градиентов давления и скорости, что отрицательно скажется на стабильности итерационного процесса.

Постановка задачи и граничные условия в CFX

Тип анализа – статический.

Модель турбулентности – SST.

Описание расчетной области:

материал – однородное вещество;

термодинамическое состояние – газ;

уравнение состояния – идеальный газ с заданными свойствами (молярная масса, удельная теплоемкость при постоянном давлении, динамическая вязкость и теплопроводность);

относительное давление – 0 Па.

Граничные условия на входе:

режим потока – дозвуковой;

полное давление и полная температура;

направление потока – перпендикулярно к плоскости;

интенсивность турбулентности – средняя (5 %).

Граничные условия на выходе:

режим потока – дозвуковой;

среднее статическое давление;

разброс значений давлений – 0.05;

тип осреднения давления – по всему выходу.

Граничные условия на стенках:

скорость потока равна нулю (условие прилипания);

стенка гладкая;

стенка адиабатическая.

Сеточная модель расчетной области

Проведено исследование влияния параметров расчетной сетки на результаты расчета. Сгенерировано семь вариантов тетрагональной сетки с различными значениями параметров сгущения и различным количеством и толщиной пристеночного слоя из призматических ячеек.

Размеры моделей колебались в диапазоне от 4 млн. до 42 млн. ячеек, количество слоев призматических ячеек у стенки – от 10 до 21. Пристеночный слой строился с опцией Smooth Transition.

На каждом из вариантов проведен расчет в CFX по приведенным выше граничным условиям. Остановка решения осуществлялась после того, как флуктуация значений невязок и контрольных параметров стабилизировалась.

По рекомендациям [3] проводился контроль безразмерного параметра Y^+ , значения которого не должны превышать 200. Также сравнивались интегральные значения скоростей, давлений и температур в различных сечениях.

При разбросе максимальных значений параметра Y^+ от 2400 до 122 (на относительно грубой сетке с минимальным количеством слоев у стенки и на мелкой сетке с максимальным количеством слоев у стенки соответственно) интегральные значения параметров потока для вариантов сетки различаются не более чем на 1 %.

Таким образом, для данной конкретной задачи при заданных геометрии, модели турбулентности и граничных условиях можно сделать вывод о сеточ-

ной независимости результатов решения и несущественном влиянии на результаты параметра Y^+ .

Ниже приводятся результаты, полученные на самой мелкой сетке со следующими параметрами: количество элементов – 42.35 млн. (из них тетраэдров – 15.33 млн., призм – 27.02 млн.); количество призматических слоев у стенки – 21.

Параметры призматических слоев у стенки: Transition Ratio – 0.3; Growth Rate – 1.25.

Результаты расчета

В результате расчета получено пространственное распределение параметров потока в БлНА, хорошо совпадающее с реальной картиной: в области за «языком» по линиям тока и эпюре полного давления на среднем радиусе выходной кольцевой щели хорошо видны завихрения потока и закрученный след (рис. 5).

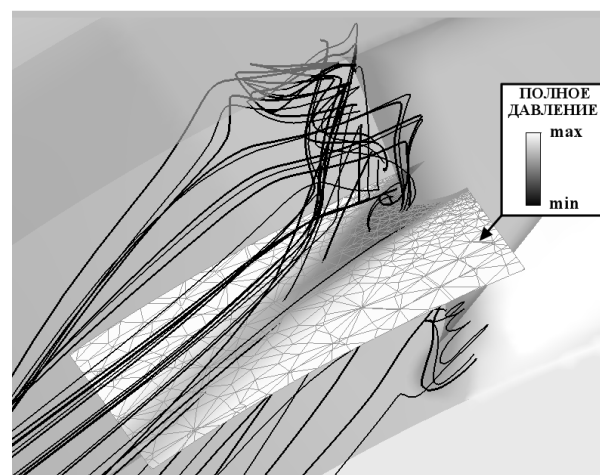


Рис. 5. Закрученный след за «языком» БлНА (линии тока и эпюра полного давления)

В сечении спиральной камеры на некотором удалении от «языка» видны вторичные течения, выражающиеся в отклонении векторов скоростей потока у стенок от основного окружного направления в сторону выходной кольцевой щели (рис. 6).

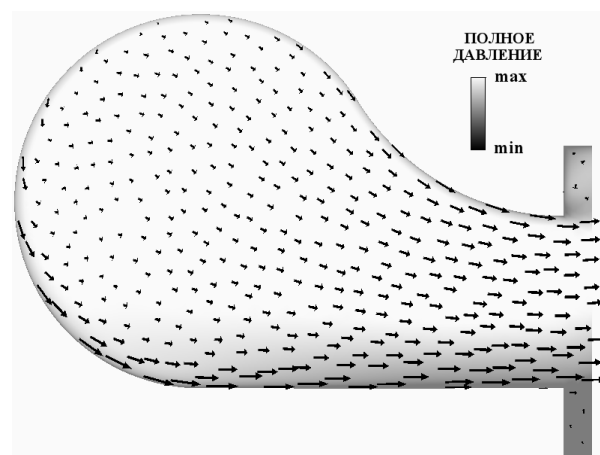


Рис. 6. Сечение спиральной камеры БлНА (эпюра полного давления и векторы скоростей)

Для понимания сложной структуры потока в БлНА целесообразно помимо интегральных значений основных параметров БлНА (α_1 и C_1) рассматривать изменение этих параметров в осевом зазоре между выходной кольцевой щелью БлНА и рабочим колесом турбины – на кольцевой поверхности, ограниченной периферийным и корневым радиусами выходной кольцевой щели. Изменение параметров потока происходит как по высоте выходной кольцевой щели l_1 , так и в окружном направлении – в зависимости от угла поворота спиральной камеры θ , отмеряемого от нулевого сечения по ходу потока.

Угол потока на выходе из БлНА α_1 определяется как арктангенс отношения осевой составляющей скорости к окружной.

На рис. 7 представлены графики изменения угла α_1 в зависимости от угла θ для трех позиций: на средней линии, у корня и у периферии выходной кольцевой щели.

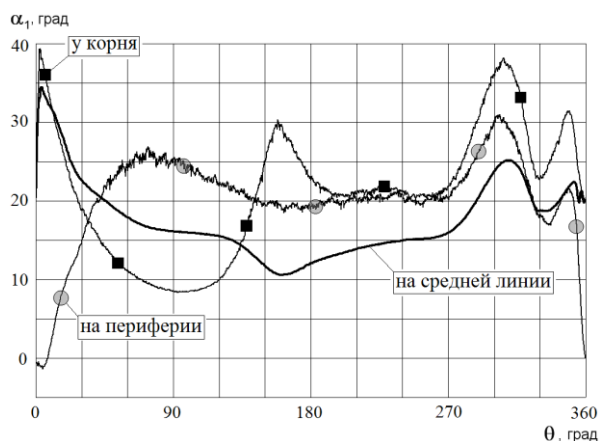


Рис. 7. Распределение значений угла α_1 по окружности выходной кольцевой щели

Из графика рис. 7 видно, что наиболее осциллирующими являются значения углов α_1 у периферии, что связано с влиянием повышенной турбулентности, причиной которой служит форма сечения спиральной камеры – спиральная камера развита вверх. Самая гладкая кривая, как и следует ожидать, – на средней линии выходной кольцевой щели.

Рассматривая соотношение значений углов α_1 на различных высотах выходной кольцевой щели, на графике рис. 7 можно выделить четыре характерных участка:

- 1) при $\theta < 45^\circ$ и $\theta > 300^\circ$ значения угла α_1 для всех радиусов быстро изменяются и достигают экстремальных значений, что обусловлено наличием в этой зоне «языка», разделяющего поток и, следовательно, вызывающего его возмущения;
- 2) при $60^\circ < \theta < 120^\circ$ значения угла α_1 на периферии – максимальны, у корня – минимальны;
- 3) при $150^\circ < \theta < 180^\circ$ значения угла α_1 у корня – максимальны, на средней линии – минимальны;

4) при $210^\circ < \theta < 270^\circ$ значения угла α_1 у корня и на периферии – максимальны, на средней линии – минимальны.

Графики распределения угла α_1 по высоте выходной кольцевой щели l_1 для $\theta = 90^\circ$; 180° и 270° представлены на рис. 8.

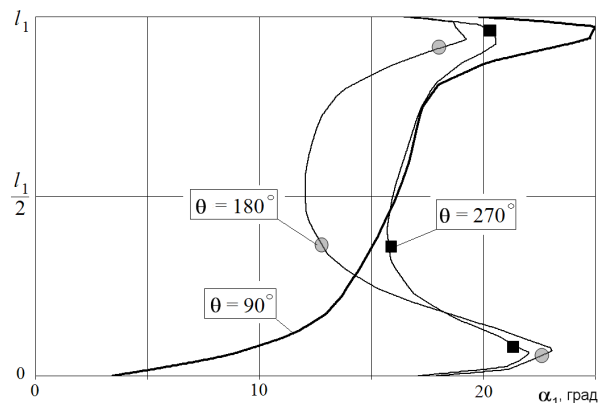


Рис. 8. Распределение значений угла α_1 по высоте выходной кольцевой щели l_1 для различных θ

Наличие перечисленных выше четырех участков свидетельствует о большой неравномерности потока по окружности и по высоте выходной кольцевой щели, что является следствием упомянутых выше развитых вторичных течений у корня и периферии.

На рис. 9 представлены графики распределения скорости на выходе из БлНА C_1 по высоте выходной кольцевой щели l_1 для $\theta = 90^\circ$; 180° и 270° .

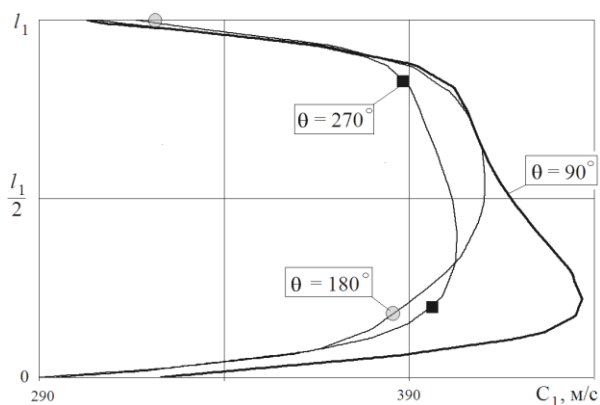


Рис. 9. Распределение значений скорости C_1 по высоте выходной кольцевой щели l_1 для различных θ

Из графика рис. 9 видно, что поле скоростей также носит неравномерный характер по высоте и окружности выходной кольцевой щели. Максимальные значения скорости на выходе из БлНА C_1 при различных значениях θ находятся выше или ниже средней линии кольцевой щели, т.е. ядро потока смещается от корня к периферии и обратно.

Можно предположить, что указанная неравномерность будет сказываться на экономичности турбины. С другой стороны, наличие реактивности

турбины будет положительным образом сказываться на течении – неравномерность, предположительно, будет снижаться. Данное явление необходимо рассмотреть при дальнейших численных исследованиях.

Верификация и валидация результатов имитационного моделирования

Расхождение проектного значения расхода через БлНА и значения расхода, полученного по результатам имитационного моделирования, составляет менее 1%.

Угол α_1 , рассчитанный по параметрам, полученным по результатам продувки воздухом БлНА, оценочно составляет $17.95 \div 18.35^\circ$ (в зависимости от принятого значения коэффициента скорости).

По результатам проведенного имитационного моделирования течения газа в БлНА интегральные значения угла α_1 , осредненные по расходу, составляют 19.93° ; интегральные значения скорости C_1 , также осредненные по расходу, – 402.8 м/с. Расхождение с проектными данными по углу α_1 не превышает 2° , по скорости C_1 – не превышает 2 %, что можно считать хорошим совпадением. Указанные интегральные значения угла α_1 и скорости C_1 получены на всей окружности выходной кольцевой щели. Если проводить осреднение не по всей окружности, а по сектору $60^\circ < \theta < 300^\circ$ (исключив зону «языка»), то значения угла α_1 составят 17.49° , скорости на выходе C_1 – 392.4 м/с, что практически совпадает с проектными и экспериментальными значениями.

Выводы

Проведено имитационное 3D-моделирование течения газа в БлНА малоразмерной газовой турбины ТНА ЖРД с использованием методов CFD.

Применена стандартная методика, включающая в себя:

- построение пространственной геометрии БлНА;

- постановку задачи в специализированном программном комплексе ANSYS CFX и расчет;
- исследование влияния параметров расчетной сетки на результаты;
- обработка и интерпретация результатов расчета;
- верификация и валидация результатов моделирования.

Полученная в результате имитационного моделирования картина распределения параметров потока соответствует основным закономерностям течения в БлНА.

Полученные значения основных параметров БлНА: угла α_1 и скорости потока на выходе из БлНА C_1 – показывают хорошее совпадение с проектными расчетами и результатами экспериментов, что позволяет сделать вывод о пригодности выбранной методики как для решения подобных задач, так и для различных исследований в рассмотренной задаче, например исследование влияния изменения геометрии БлНА на параметры потока, влияния изменения граничных условий (режимов работы) и др.

В дальнейшем планируется численное исследование проточной части рассматриваемой турбины с рабочим колесом по приведенной в данной статье методике с последующим сравнением результатов проведенных расчетов, что даст возможность оценить влияние рабочего колеса на структуру потока в БлНА.

Литература

1. Мишин, А.Т. Безлопаточные направляющие аппараты в турбинах как средство обеспечения высокой надежности ТНА [Текст] / А.Т. Мишин // Научно-технический юбилейный сборник КБ химавтоматики. – Воронеж: ИПФ «Воронеж», 2001. – С. 333 – 337.
2. Шерстюк, А.Н. Радиально-осевые турбины малой мощности [Текст] / А.Н. Шерстюк, А.Е. Зарянкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
3. ANSYS Help : 14.0 Release [Электронный ресурс]. – электрон. руководство пользователя к программе. – USA : SAS IP, Inc., 2010.

ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики», г. Воронеж
Воронежский государственный технический университет

GAS FLOW 3D-SIMULATION IN VANELESS DISTRIBUTOR OF LOW-SIZED AXIAL GAS TURBINE

D.V. Borovkov, Y.V. Demyanenko

This work observes numerical investigation of a 3D-flow in vaneless distributor of low-sized axial gas turbine of liquid-propellant rocket engine turbopump. The average values and characteristics of a flow in vaneless distributor – outlet angle and velocity – are performed using CFD. Comparison of experiment, numerical simulation and engineering account is given

Key words: vaneless distributor, axial turbine, ANSYS CFX

МНОГОАЛЬТЕРНАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

А.К. Тищенко, Е.М. Васильев, А.О. Тищенко

Анализируются критические режимы функционирования автономной системы электроснабжения космической станции. Показано, что высокие показатели надёжности системы в указанных режимах достигаются в результате использования в алгоритмах её управления эволюционных принципов многоальтернативности

Ключевые слова: космическая станция, критические режимы, многоальтернативное управление

1. Введение

Обеспечение высокой надёжности систем электроснабжения (СЭС) космических аппаратов методами пассивного резервирования существенно усложняется по мере роста мощности бортовых потребителей и разнообразия режимов их совместного функционирования [1-4]. Орбитальные космические станции, оснащённые развитыми подсистемами жизнеобеспечения экипажа, комплексами навигационного и научного оборудования, требуют решения задачи надёжного автономного электроснабжения на основе принципов структурного перестроения СЭС в зависимости от текущих условий энергопотребления, в том числе и в критических режимах, обусловленных нештатным изменением указанных условий или отказами элементов системы.

К таким принципам относится принцип многоальтернативности, теоретически сформулированный в работах [5,6], существо которого состоит в построении сложных систем с использованием эволюционных механизмов адаптации и выживаемости биологических сообществ: модульности построения, многоуровневости подсистем регулирования жизненно важными процессами, многообразия поведенческих стратегий. В [7-9] рассмотрена реализация системы электроснабжения, алгоритмы функционирования которой отвечают указанным принципам и обеспечивают многолетнее бесперебойное электроснабжение Международной космической станции вплоть до настоящего времени. В предлагаемой статье на основе математических и имитационных моделей основных узлов указанной системы приводятся результаты исследования процессов в СЭС, иллюстрирующие эффективность применения принципов многоальтернативности в критических режимах её функционирования.

2. Общий состав системы

К основным подсистемам рассматриваемой системы электроснабжения относятся (рис. 1):

подсистема солнечных батарей, являющаяся первичным источником энергии на борту станции;

подсистема источника высокого напряжения, находящегося на внешнем по отношению к космической станции аппарате и играющего роль вторичного источника энергии;

подсистема электрохимических аккумуляторных батарей, накапливающих энергию при её избытке в системе и отдающей – при недостатке.

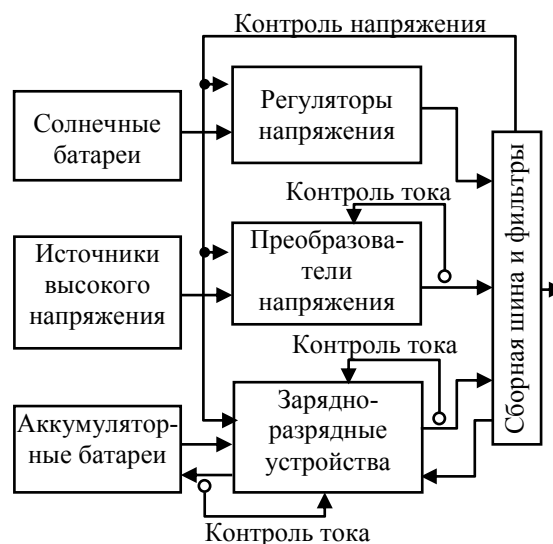


Рис. 1. Общий состав системы электроснабжения

Все подсистемы снабжены контурами автоматического регулирования, взаимодействие которых в различных режимах работы будет рассмотрено ниже.

3. Подсистема солнечных батарей

Функциональная схема системы стабилизации напряжения для солнечной батареи представлена на рис. 2.

Регулируемой величиной является напряжение U_n на нагрузке.

Задающее воздействие – постоянное опорное напряжение $U_{оп}$.

Наиболее существенными внешними воздействиями на подсистему солнечных батарей являются:

R_n – сопротивление нагрузки, Ом;

W – плотность светового потока, Вт/м²;

T – температура элементов батарей, К.

Общее число $N_{сб}$ солнечных батарей полностью обеспечивает все потребители электроэнергией за счёт параллельного включения.

Тищенко Анатолий Константинович – ЗАО “Орбита”, канд. техн. наук, тел. (473) 239-18-59

Васильев Евгений Михайлович – ВГТУ, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: vgtu-aits@yandex.ru

Тищенко Артём Олегович – ВГТУ, студент, тел. (473) 243-77-76, e-mail: vgtu-aits@yandex.ru

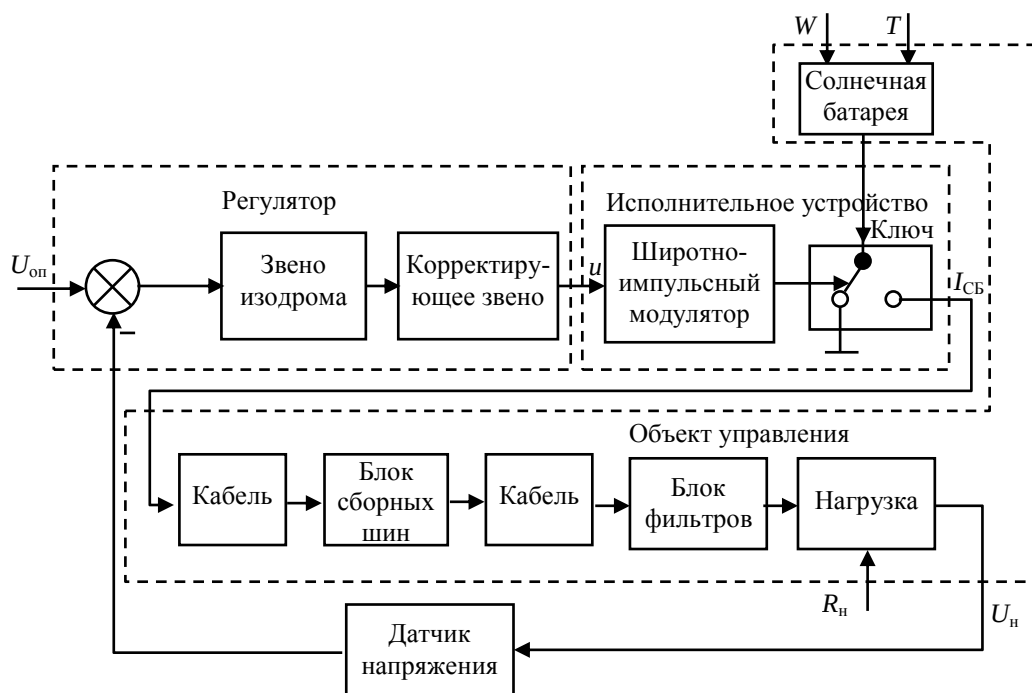


Рис. 2. Функциональная схема системы стабилизации напряжения при питании от солнечной батареи

Система регулирования параллельно работающих солнечных батарей в широком диапазоне изменения тока нагрузки построена на эволюционном принципе многоуровневости управления, в соответствии с которым по мере роста тока нагрузки поочередно подключается необходимое число $n \leq N_{\text{СБ}}$ батарей таким образом, что $n-1$ батарей отдают в нагрузку максимально возможный ток $I_{\text{СБ, max}}$, определяемый их вольт-амперными характеристиками, температурой T и плотностью светового потока W , одна батарея с условным номером n , подключившаяся последней, работает в режиме широтно-импульсного регулирования отдаваемого тока в соответствии со схемой рис. 2, а оставшиеся $N_{\text{СБ}} - n$ батарей остаются незадействованными.

В результате при любом значении тока нагрузки осуществляется регулирование не всей отдаваемой подсистемой солнечных батарей мощности, а только той её части, которая приходится на одну батарею. Этим достигается не только существенное упрощение задачи обеспечения устойчивости и показателей качества системы регулирования, но и возможность унификации контуров управления каждой батареей и блочного построения подсистемы из взаимозаменяемых блоков, что в совокупности обеспечивает надёжное функционирование подсистемы в широком диапазоне изменения её параметров, нагрузок и при отказах отдельных блоков. В частности, отказ или отключение любого количества солнечных батарей не изменяет динамические свойства системы управления.

Для технической реализации изложенного принципа работы подсистемы солнечных батарей используется разбиение общей зоны её регулирования на неперекрывающиеся диапазоны активного регулирования для каждой батареи. На рис. 3 пока-

зан пример такого разбиения для $N_{\text{СБ}} = 3$, где u – сигнал управления на входе широтно-импульсного преобразователя; $I_{\text{СБ}1}, \dots, I_{\text{СБ}3}$ – токи солнечных батарей $\text{СБ}_1, \dots, \text{СБ}_3$, отдаваемые в нагрузку.

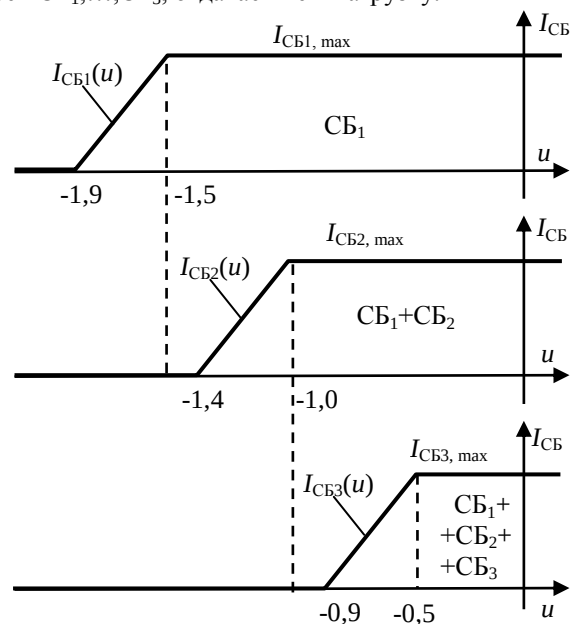


Рис. 3. Регулировочные характеристики преобразователей для трёх солнечных батарей

При значениях сигнала управления $u > -0,5$ все три батареи будут стремиться отдать свой максимальный ток в нагрузку. Если сумма этих токов избыточна и для электроснабжения достаточно, например, тока одной батареи, то в результате действия обратной связи управление u будет уменьшаться, последовательно отключая от нагрузки СБ_3 и СБ_2 до тех пор, пока u не войдёт в диапазон -

$1.9 \leq u \leq 1.5$ активного регулирования тока батареи СБ₁.

Результаты моделирования описанных процессов для ситуаций с попаданием в тень и аварийным отключением одной из двух работающих солнечных батарей представлены на рис. 4.

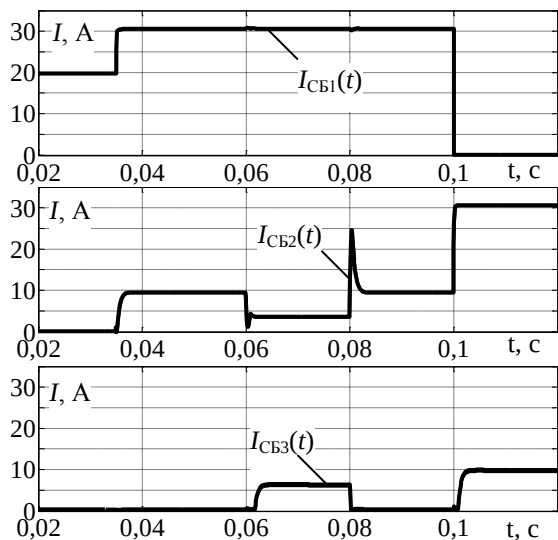


Рис. 4. Переключение солнечных батарей в режимах с затенением СБ₂ и отключением СБ₁

На рис. 4 иллюстрируются следующие критические режимы функционирования подсистемы солнечных батарей:

1. В момент времени $t=0,035$ с происходит скачкообразное увеличение тока нагрузки с 20 А до 40 А. Поскольку максимальный ток одной батареи $I_{CB,max}=30$ А, то батарея СБ₁ начинает отдавать в нагрузку свой полный ток 30 А и дополнительно в работу вступает батарея СБ₂, отдающая регулируемый ток 10 А. Батарея СБ₃ для электроснабжения потребителей в этом режиме не требуется, и её ток, отдаваемый в нагрузку, равен нулю.

2. На интервале времени $t=[0,06;0,08]$ с возникает затенение батареи СБ₂ (плотность светового потока уменьшается с $W=1000$ Вт/м² до $W=100$ Вт/м²). Полный ток, отдаваемый этой батареей, падает с $I_{CB2}=10$ А до значения $I_{CB2}=4$ А, и недостающий для нагрузки ток 6 А потребители получают от батареи СБ₃.

3. В момент времени $t=0,1$ с имитируется аварийное отключение батареи СБ₁. Необходимый для потребителей ток 40 А обеспечивается полным током батареи СБ₂ и регулируемым током 10 А батареи СБ₃.

4. Подсистема вторичного источника высокого напряжения

Функциональная схема подсистемы с внешним вторичным источником высокого напряжения показана на рис. 5.

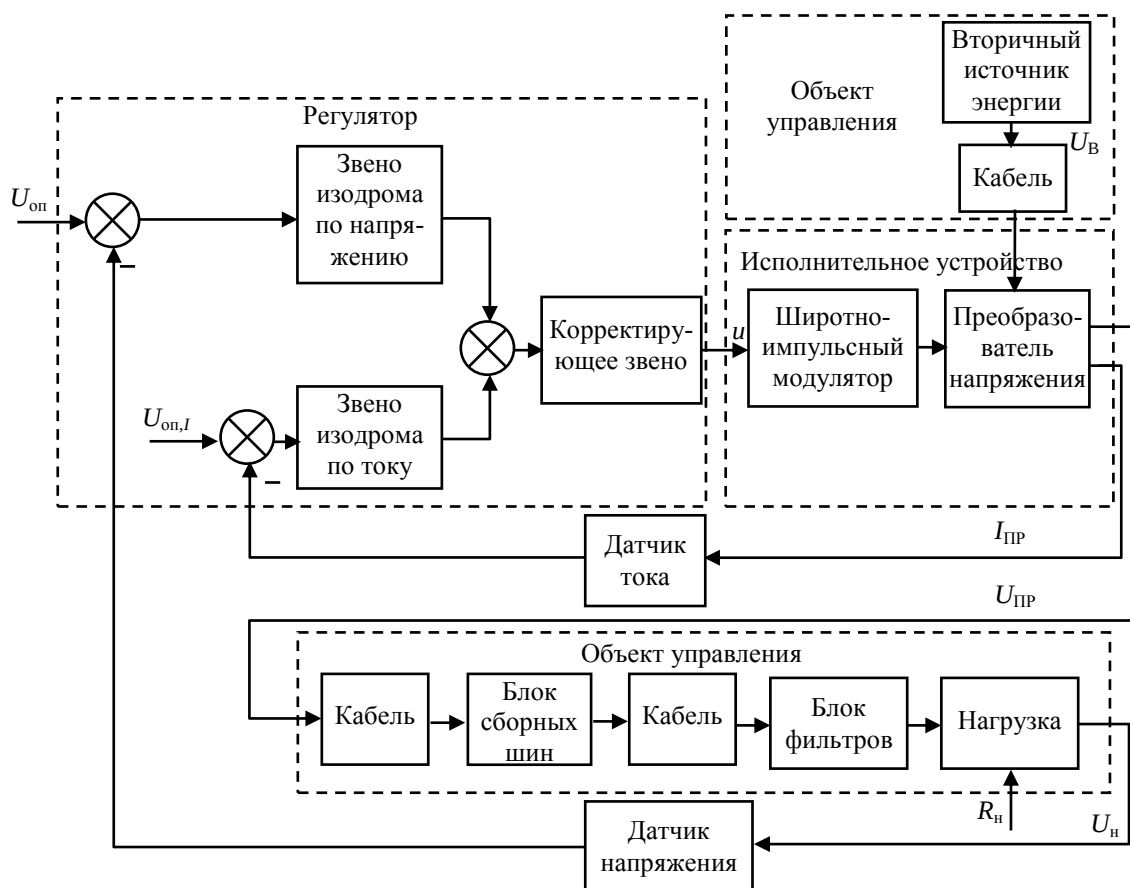


Рис. 5. Функциональная схема системы стабилизации напряжения и тока при питании от внешнего вторичного источника высокого напряжения

Рассматриваемая подсистема предназначена для подключения к потребителям электроэнергии внешнего высоковольтного источника энергии, напряжение U_B которого с целью совместной работы с подсистемой солнечных батарей согласуется с последними с помощью управляемого преобразователя (см. рис. 5).

Для обеспечения высокой надёжности работы этой подсистемы использован многоальтернативный принцип селективности – разделения и специализации её функций, обеспечивающих устойчивую работу подсистемы в различных режимах. Поскольку высоковольтный источник энергии является источником напряжения, то наиболее распространённым критическим режимом его функционирования является режим перегрузки по току, и техническая реализация указанного принципа заключается в том, что при токах преобразователя $I_{ПР}$, не превышающих заданного значения $I_{ПР, \max}$, в подсистеме функционирует контур регулирования напряжения U_H (см. рис. 5); но если в случае аварийного либо штатного роста мощности потребления ток преобразователя достигнет критической величины $I_{ПР, \max}$, то управление переходит к контуру регулирования тока, обеспечивающему сохранение равенства $I_{ПР} = I_{ПР, \max}$, безопасного для оборудования. Контур регулирования (стабилизации) напряжения при этом параметрически блокируется за счёт большего коэффициента передачи канала управления током. При снятии нагрузки автоматически осуществляется обратная передача функции управления подсистемой от контура тока к контуру напряжения.

Иллюстрация критических режимов работы подсистемы вторичного источника напряжения представлена на рис. 6.

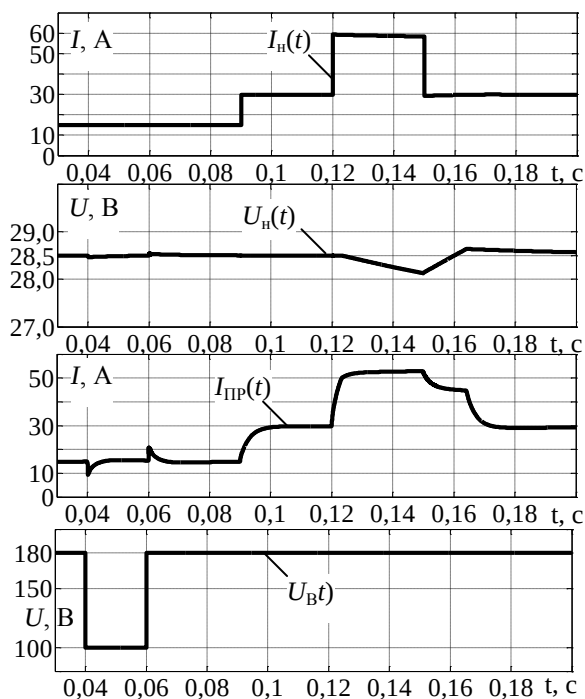


Рис. 6. Функционирование подсистемы вторичных источников энергии в режимах перегрузки по току и провалов входного напряжения

На рис. 6 показаны:

1. $I_n(t)$ – изменение тока нагрузки в момент времени $t=0,09$ с со значениями 15 А до 30 А. Эти значения не превышают максимального тока преобразователя $I_{ПР, \max}=50$ А. В интервале времени $t=[0,12;0,15]$ с требуемый ток нагрузки $I_n=60$ А выходит за пределы $I_{ПР, \max}$.

2. $U_H(t)$ – изменение напряжения на нагрузке. Видно, что в диапазоне допустимых токов $I_n \leq I_{ПР, \max}$ контур регулирования напряжения стабилизирует значение U_H на заданном уровне $U_H=28,5 \pm 0,5$ В; при перегрузке по току для сохранения равенства $I_{ПР}=I_{ПР, \max}$ напряжение U_H снижается.

3. $I_{ПР}(t)$ – изменение тока, отдаваемого преобразователем в нагрузку. В интервале $t=[0,12;0,15]$ с управление преобразователем переходит к контуру тока, который ограничивает ток преобразователя значениями 50...52 А.

4. $U_B(t)$ – изменение уровня входного напряжения, подаваемого на преобразователь. На интервале времени $t=[0,04;0,06]$ с воспроизводится кратковременное падение (провал) этого напряжения со 180 В до 100 В. Работающий в этом режиме контур регулирования напряжения поддерживает значение $U_H(t)$ на заданном уровне.

Совместная работа подсистемы высоковольтного источника энергии с другими подсистемами рассматривается ниже.

5. Подсистема аккумуляторных батарей

Рассматриваемая подсистема выполняет две функции [10]:

накопление энергии при её избытке на станции;

снабжение потребителей электроэнергией при её недостатке (затенение солнечных батарей и отсутствие внешнего вторичного источника питания).

Функциональная схема, поясняющая реализацию принципа многоуровневости и разделения функций в подсистеме, изображена на рис. 7, на котором показано, что реверсивный преобразователь напряжения управляется двумя независимыми каналами регулятора (канал заряда и канал разряда), каждый из которых содержит двухуровневую систему управления: по напряжению (при токах, не превышающих критические значения) и по току (при токах, стремящихся превысить критическое значение).

Переключение работы этих каналов осуществляется автоматически в результате выделения в общем диапазоне регулирования напряжения в системе электроснабжения отдельных уровней (зон) работы всех её подсистем (рис. 8). Переход из одной зоны в другую происходит в соответствии с текущим значением тока нагрузки и состоянием аккумуляторных батарей, в частности: при небольшой мощности работающих потребителей они обеспечиваются электроэнергией от солнечных батарей, которые поочерёдно подключаются по мере роста потребляемой мощности (см. рис. 3), причём к потребителям относятся также аккумуляторные батареи, работающие в режиме заряда.

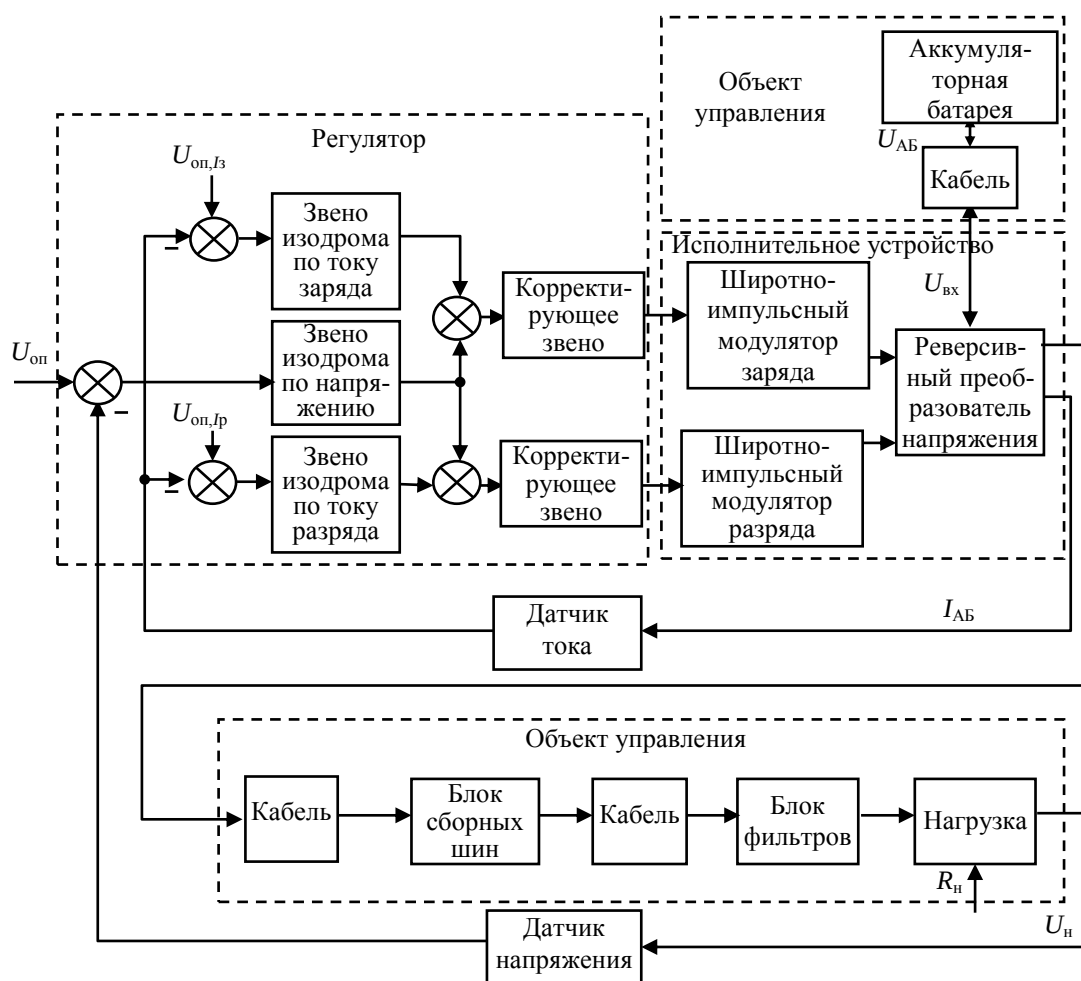


Рис. 7. Функциональная схема стабилизации напряжения и тока при питании от аккумуляторных батарей

Если мощность потребителей превысит суммарную мощность подсистемы солнечных батарей, то сигнал управления u перейдёт в зону активного регулирования вторичного источника питания, переводя все солнечные батареи в режим отдачи полного тока (см. рис. 8).

Дальнейший рост мощности потребителей, не обеспечиваемой подсистемами солнечных батарей из-за перехода станции в теньевую часть орбиты, а также в случае отключения внешнего вторичного источника приведёт систему в состояние, при котором будет прекращён заряд аккумуляторных батарей и они перейдут в режим разряда (см. рис. 8).

Реверсивный преобразователь подсистемы аккумуляторных батарей управляет режимами заряда и разряда с помощью регулируемого напряжения вольтодобавки $U_{ВД}$, выбираемого автоматически в зависимости от текущей разности напряжения на нагрузке и на зажимах аккумуляторных батарей.

Управление u является единым для всех подсистем питания и обеспечивает их согласованное взаимодействие. На рис. 9 иллюстрируется процесс такого взаимодействия при значительном изменении тока нагрузки и существенном затенении солнечных батарей. Во всех ситуациях в системе потребители бесперебойно обеспечиваются электроэнергией, из-

быток которой (при $I_H < 60$ А, см. рис. 9) направляется на заряд аккумуляторных батарей.

Таким образом, многоуровневое управление осуществляется не только в отдельных подсистемах, но и в системе электроснабжения станции в целом.

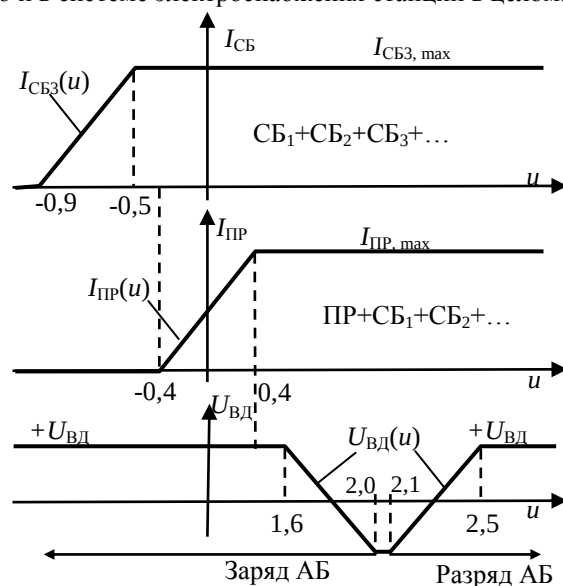


Рис. 8. Диапазоны работы солнечных батарей, вторичного источника и аккумуляторных батарей

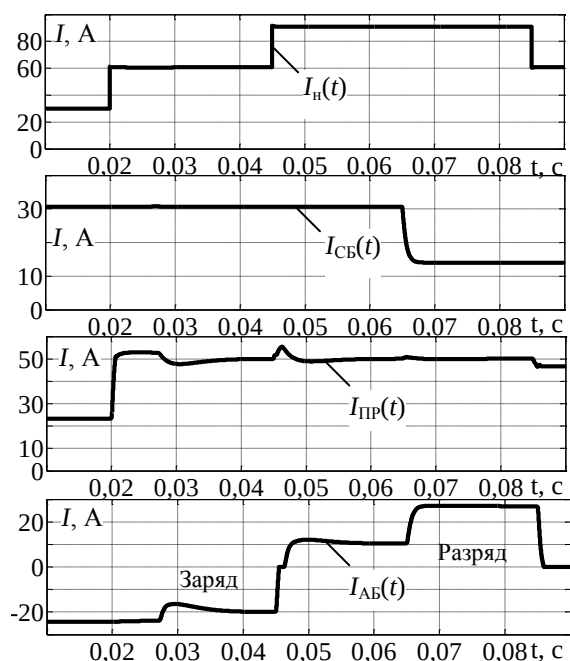


Рис. 9. Взаимодействие подсистем питания при изменении тока нагрузки и затенении при $t > 0,065$ с

6. Заключение

Анализ критических режимов работы автономной системы электроснабжения космической станции показывает, что живучесть рассматриваемой системы достигается в результате применения эволюционных принципов многоальтернативного управления [11]:

- многоуровневости, создающей многообразие поведенческих стратегий системы путём передачи управления и распределения функций электроснабжения между подсистемами и в каждой из них в зависимости от текущей ситуации;

- модульности, многократно снижающей возможность каскадного (технологически связанного) развития аварийной ситуации и отказа;

- разделения функций, обеспечивающего высокую эффективность организованных каналов управления с узкими функциональными назначениями.

На основе этих принципов реализуется активное перенаправление энергетических и информационных потоков системы и изменение стратегии функционирования её подсистем в экстремальных ситуациях.

ЗАО «Орбита», г. Воронеж

Воронежский государственный технический университет

MULTIPLE-CHOICE CONTROL OF CRITICAL MODES POWER-SUPPLY SYSTEM SPACE STATION

A.K. Tishchenko, E.M. Vasiljev, A.O. Tishchenko

Critical modes of functioning of operation autonomous power-supply system space station are analyzed. It is shown, that high parameters of reliability of system in the specified modes are achieved as a result of use in algorithms of its control evolutionary principles multiple-choice

Key words: space station, critical modes, multiple-choice control

Литература

1. Половко, А.М. Основы теории надёжности [Текст] / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
2. Выбор структуры систем электроснабжения низкоорбитальных космических аппаратов [Текст] / Ю.А. Шиняков, А.С. Гуртов, К.Г. Гордеев и др. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – № 1. – С. 103–113.
3. Петровичев, М.А. Система энергоснабжения бортового комплекса космических аппаратов [Текст] / М.А. Петровичев, А.С. Гуртов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. университета, 2007. – 88 с.
4. Шиняков, Ю.А. Энергетический анализ структурных схем электроснабжения автоматических космических аппаратов [Текст] / Ю.А. Шиняков // Изв. Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 8. – С.152–155.
5. Подвальный, С.Л. Эволюционные принципы формирования структуры вычислительных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Адаптация в сложных системах управления: сб. науч. тр. – Воронеж: ВПИ, 1979. – С. 60–63.
6. Подвальный, С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 2. – С. 4–13.
7. Тищенко, А.К. Унифицированная система энергоснабжения для космических аппаратов [Текст] / А.К. Тищенко, П.Т. Ганкевич, Г.Д. Лившин // Энергия. Научно-практический вестник. – 1999. – № 3. – С. 34–51.
8. Пат. № 2152069 Российская Федерация, МПК G05F1/59, H02J7/34, H02J9/00. Автономная система электропитания [Текст] / Тищенко А.К., Ганкевич П.Т., Савенков В.В. и др.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Орбита". – № 98119125/09; заявл. 21.10.1998; опубл. 27.06.2000, Бюл. № 18 (II ч.). – С. 439.
9. Пат. № 2211479 Российская Федерация, МПК G05F1/66, H02J7/34. Автономная система электропитания [Текст] / Тищенко А.К., Ганкевич П.Т., Савенков В.В. и др.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Орбита". – № 2001100777/09; заявл. 09.01.2001; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24 (III ч.). – С. 796.
10. Данилов, А.Д. Анализ систем электроснабжения космических аппаратов [Текст] / А.Д. Данилов, А.О. Тищенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Т. 10, № 5.1. – С. 82–84.
11. 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.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВОГО КОНТРАСТА С УЧЕТОМ ФОРМЫ И РЕЛЬЕФА ИХ ПОВЕРХНОСТИ

В.Г. Керков, В.Д. Мочалин, Г.Л. Тюрин

Выявлены и исследованы закономерности влияния формы и рельефа поверхности средств снижения контраста в инфракрасном диапазоне длин волн на их эффективность, обоснована предпочтительная форма элементов рельефа средств снижения контраста

Ключевые слова: средство снижения теплового контраста, распределение температуры, эффективность

Для снижения заметности объектов в инфракрасном диапазоне длин волн, как правило, применяются средства снижения теплового контраста (ССТК), позволяющие скрыть либо значительно уменьшить демаскирующие признаки объекта при его обнаружении техническими средствами разведки.

Стремление к уменьшению массы ССТК приводит к необходимости использования материалов с низкой теплопроводностью. В этом случае форма элементов рельефа может повлиять на распределение температуры на поверхности ССТК, следовательно, и на тепловой контраст.

Целью настоящей работы является проведение анализа и выявление закономерностей влияния формы и рельефа поверхности ССТК на их эффективность в инфракрасном диапазоне длин волн.

В качестве объекта исследования рассмотрим предельный случай, когда коэффициент теплопроводности материала ССТК близок к нулю.

Проанализируем механизм влияния формы элементов рельефа на их контраст. Для этого рассмотрим прямоугольную пластину и полуцилиндр из материала с близким к нулю коэффициентом теплопроводности (λ), нормально ориентированной по отношению к солнечным лучам поверхностью (для полуцилиндра – поверхностью основания) и поперечными размерами, не превышающими линейного разрешения средств разведки (рис. 1 а, б). При этом считаем, что тепловым потоком от внутренних источников вследствие высокого теплового сопротивления материала можно пренебречь.

Очевидно, что при отсутствии солнечной радиации температура пластины и полуцилиндра будет примерно одинаковой и близкой к температуре атмосферы. При наличии прямой солнечной радиации температура полуцилиндра, в отличие от температуры пластины, будет неравномерно распределена по его поверхности. Это обусловлено зависимостью мощности поглощаемой элементарным участком поверхности полуцилиндра солнечной радиации от уг-

ла ϕ между направлением на солнце и нормалью к поверхности в данной точке. Максимальная температура, равная температуре поверхности пластины, наблюдается при нормальном падении солнечных лучей (точка А на рис. 1б), минимальная – при $\phi = \pm\pi/2$ (точка В на рис. 1б).

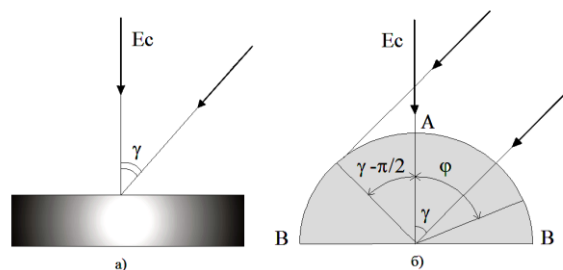


Рис. 1. Поперечное сечение прямоугольного элемента (пластины) и полуцилиндра

Очевидно, что средняя в элементе разрешения температура полуцилиндра окажется меньше, чем температура пластины. Для ее количественной оценки воспользуемся формулой, позволяющей рассчитывать среднюю по площади проекции на направления наблюдения радиационную температуру полуцилиндра [1]:

$$\bar{T}_{нц}(\gamma) = (1 + \cos \gamma)^{-1} \int_{\gamma - \frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} T_R(\phi) \cos(\phi - \gamma) d\phi, \quad (1)$$

где $T_R(\phi)$ – распределение радиационной температуры по поверхности элемента рельефа;

γ – угол между нормалью к основанию полуцилиндра и направлением наблюдения, ($0 \leq \gamma \leq \pi/2$).

Радиационную температуру поверхности полуцилиндра $T_R(\phi)$ можно определить, используя соотношения, приводимые в [2]. Результаты расчета зависимости $\Delta T(\gamma) = \bar{T}_{нц}(\gamma) - T_{рф}$ с использованием соотношения (1) для характеристик внешней среды, соответствующей летнему полдню (при значениях коэффициента излучения поверхности $\epsilon = 0.9$), представлены на рис. 2.

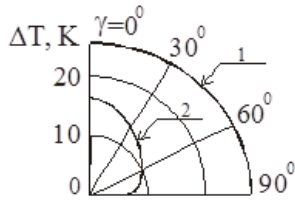


Рис. 2. Зависимость контраста от угла наблюдения: 1 – прямоугольная пластина, 2 – полуцилиндр

Из рисунка следует, что максимальный контраст полуцилиндра, имеющий место при нормальном по отношению к поверхности его основания наблюдении ($\gamma=0^\circ$), на 10 К меньше контраста пластины. Увеличение угла γ сопровождается уменьшением контраста, так как вклад в него высокотемпературных участков полуцилиндра уменьшается, а низкотемпературных – увеличивается.

Необходимо отметить, что теплоотдача во внешнюю среду для пластины и полуцилиндра, несмотря на существенное отличие площадей их поверхности, в этом случае (при значениях коэффициента теплопроводности $\lambda \rightarrow 0$) практически одинакова. Следовательно, снижение по сравнению с пластиной контраста полуцилиндра происходит за счет собственно кривизны его поверхности, приводящей к ее неравномерному нагреву под воздействием солнечной радиации.

На радиационную температуру пластины с рельефной поверхностью оказывают влияние два дополнительных фактора: взаимная облученность и экранирование элементов рельефа.

Тепловой режим слабо облученных солнечной радиацией участков элементов рельефа формируется в основном под воздействием атмосферы, вследствие чего их температура, соответственно и светимости, соизмеримы. Энергия с относительно высокотемпературных участков (окрестность точки А на рис.1) излучается преимущественно во внешнюю среду. Следовательно, учет разности между облученностью элемента рельефа атмосферой и соседними элементами не может существенно повлиять на радиационную температуру пластины с рельефом цилиндрической формы. Поэтому основное отличие расчета радиационной температуры отдельного элемента рельефа и рельефной пластины в целом состоит в учете в последнем случае взаимного экранирования элементов рельефа. При этом формула (1) преобразуется к виду:

при $\gamma \leq \beta$

$$\bar{T} = T_R \left(\frac{\pi}{2} \right) (\cos(\beta - \gamma) + 2 \cos \gamma - \sin(\beta - \gamma + \arcsin(2 \cos \beta + 1))) + (2 \cos \gamma)^{-1} \int_{\phi_1}^{\phi_2} T_R(\phi - \beta) \cdot \cos(\phi - \gamma) d\phi,$$

при $\gamma \geq \beta$

$$\bar{T} = (2 \cos \gamma)^{-1} \int_{\phi_{31}}^{\phi_4} T_R(\phi - \beta) \cos(\phi - \gamma) d\phi,$$

$$\text{где } \phi_1 = \beta - \frac{\pi}{2}; \quad \phi_2 = \beta + \arcsin(2 \cos \beta + 1);$$

$$\phi_3 = \gamma - \frac{\pi}{2}; \quad \phi_4 = \gamma + \arcsin(2 \cos \gamma - 1); \quad \beta - \text{угол между}$$

нормалью к пластине $\vec{N}$ и направлением облучения;

$$0 \leq \gamma, \quad \beta \leq \frac{\pi}{2}.$$

Результаты расчета контраста пластины приведены на рис. 3.

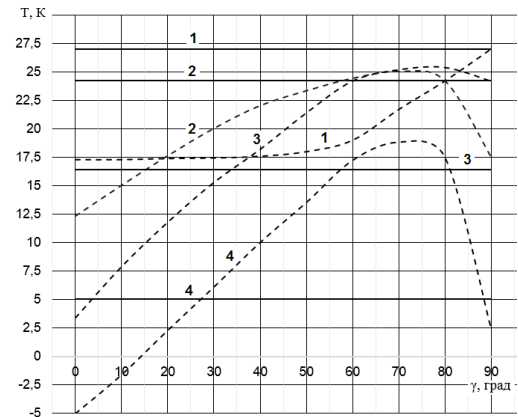


Рис. 3. Радиационный контраст пластины с плоской и рельефной поверхностью (— — плоская, - - - рельефная, $\beta=0^\circ$ - линии 1, $\beta=20^\circ$ - линии 2, $\beta=40^\circ$ - линии 3, $\beta=60^\circ$ - линии 4)

Из рисунка следует, что зависимость контраста пластин от угла наблюдения γ качественно отличается от аналогичной зависимости для отдельного элемента рельефа. При $\beta=0$ увеличение угла наблюдения γ сопровождается ростом контраста пластины,

достигающего максимума при $\gamma = \frac{\pi}{2}$. Увеличение

угла облучения приводит к уменьшению значения максимума контраста и его смещению в сторону меньших углов наблюдения. Из рисунка видно также, что при $\beta \geq 0$ максимальные значения контраста рельефной пластины превышают контраст пластины с плоской поверхностью.

Анализ рис. 4, на котором изображена зависимость произведения абсолютного значения контраста пластины на площадь ее проекции на направление наблюдения от угла наблюдения, свидетельствует о более высокой эффективности с точки зрения снижения контраста объектов рельефных поверхностей при угле облучения $0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$. Увеличение угла облучения сопровождается снижением эффективности рельефной пластины при больших углах наблюдения $\gamma > 30^\circ$.

Следует отметить, что исследования влияния рельефа на радиационный контраст пластины проводились в наиболее неблагоприятных условиях, когда направление облучения находилось в плоскости, перпендикулярной образующим элементов рельефа цилиндрической формы. Нетрудно показать, что несоблюдение этого условия приводит к снижению контраста пластин. Например, при нахождении направления облучения в плоскости, перпендику-

лярной пластине и параллельной образующим элементов рельефа, контраст рельефной пластины при любых углах облучения и наблюдения не превышает контраста пластины с плоской поверхностью (рис. 5).

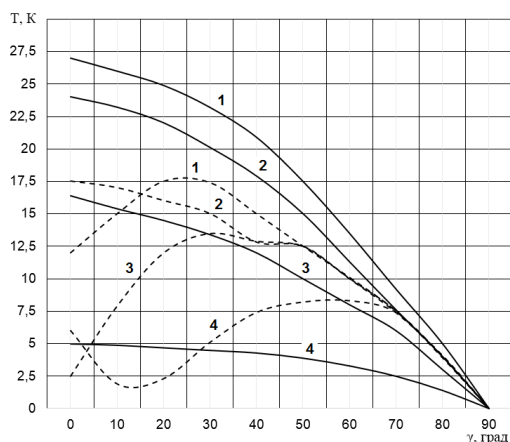


Рис. 4. Характеристика вклада пластины в заметность объекта (——— — плоская, ---- — рельефная, $\beta=0^\circ$ - линии 1, $\beta=20^\circ$ - линии 2, $\beta=40^\circ$ - линии 3, $\beta=60^\circ$ - линии 4)

До сих пор принималось, что теплопроводность λ элементов рельефа близка к выравниванию температуры по их поверхности, т.е. эффект, обусловленный кривизной поверхности, уменьшается, но увеличивается эффективная площадь теплоотдачи во внешнюю среду. В пределе ($\lambda \rightarrow \infty$) она увеличивается по сравнению с плоской пластиной в $\pi/2$ раз, при этом контраст пластины $\Delta T(\gamma)=13\text{K}=\text{const}$, $\beta=0^\circ$.

Таким образом, рельеф пластины в большинстве случаев снижает ее радиационный контраст при наличии облученности прямой солнечной радиацией. Механизм его снижения зависит от теплопроводности элементов рельефа. При высокой теплопроводности снижение контраста происходит за счет увеличения эффективной площади теплоотдачи, при низкой — за счет кривизны поверхности элементов рельефа.

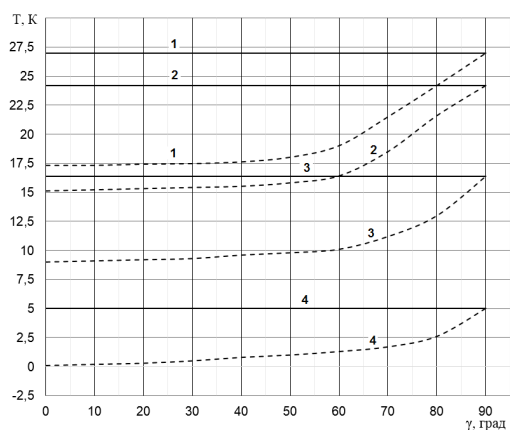


Рис. 5. Зависимость радиационного контраста пластины с плоской и рельефной поверхностью от углов облучения и наблюдения, находящихся во взаимно перпендикулярных плоскостях (——— — плоская, ---- — рельефная, $\beta=0^\circ$ - линии 1, $\beta=20^\circ$ - линии 2, $\beta=40^\circ$ - линии 3, $\beta=60^\circ$ - линии 4)

Оценим влияние на контраст пластины формы элементов ее рельефа. Рассмотрим вначале случай $\gamma=\beta=0$. При произвольной форме элемента рельефа

формула для определения его средней проекции на направлении наблюдения радиационной температуры в декартовой системе координат имеет вид [1]:

$$\bar{T} = \frac{1}{S} \iint_G T_R(\phi) \cos \phi dx dy, \quad (2)$$

где $\phi = (\vec{n}, \vec{N})$ - угол между нормалью $\vec{n}$ к поверхности элемента и нормалью $\vec{N}$ к поверхности его основания, G - область определения функции $z = f(x, y)$, описывающей поверхность элемента рельефа, S - площадь области G .

В данном случае оценить влияние формы элемента рельефа на его радиационную температуру достаточно просто. Действительно, чем меньше угол ϕ , тем выше температура элементарного участка поверхности и больше площадь ее проекции на направление наблюдения.

При $(x, y) \in G$, $T_R(\phi)|_{\phi=0} = T_{R\max} = \text{const}$, поэтому в

соответствии с формулой (2) $\bar{T} = T_{R\max}$. Очевидна и форма элементов рельефа, удовлетворяющая условию $\phi(x, y) = 0$ - тела с параллельной направлению наблюдения образующей и перпендикулярным ему основанием. Повышение теплопроводности элементов рельефа такой формы может привести к существенному снижению температуры пластины за счет увеличения эффективной площади теплоотдачи.

Минимальная радиационная температура, соответствующая отсутствию солнечной радиации,

будет наблюдаться при $\phi(x, y) \rightarrow \frac{\pi}{2} = \text{const}$,

$(x, y) \in G$. Это условие выполняется для элементов рельефа клиновидной, пирамидальной или конусообразной формы. Увеличивая высоту этих фигур, можно как угодно приблизить величину угла к значению $\pi/2$. Следует отметить, что при равномерной облученности поверхности элемента рельефа солнечной радиацией (конус, пирамида) радиационная температура (контраст) не зависит от его теплопроводности.

Радиационная температура элементов рельефа любой другой формы будет находиться в интервале $T_R(0) \dots T_R(\phi)|_{\phi=\frac{\pi}{2}}$ и может быть оценена по формуле

(2).

Таким образом, изменяя форму элементов рельефа в рассматриваемом случае ($\gamma=\beta=0$), можно изменять радиационную температуру пластин от минимально до максимально возможных значений при данных условиях теплообмена.

Иначе обстоит дело при переменных и в общем случае не совпадающих направлениях облучения и наблюдения элементов рельефа произвольной формы. Использование для анализа и влияния на радиационную температуру пластины с рельефной поверхностью выражения, аналогичного выражению (2), невозможно из-за невозможности определения границ интегрирования по общему виду уравнения $z = f(x, y)$ поверхности элемента рельефа. Анализ

осложняется также необходимостью учета в данном случае взаимного экранирования элементов рельефа, зависящего как от формы, так и расположения относительно друг друга.

Однако, проводя анализ на физическом уровне, можно выявить некоторые закономерности, позволяющие качественно оценить влияние той или иной формы элементов рельефа на радиационную температуру пластины.

1. Основываясь на результатах, полученных для цилиндрической формы элементов рельефа, можно заключить, что индикатриса излучения, соответственно и радиационная температура рельефной пластины, существенно неравномерна по пространству и определяется соотношением направлений ее облучения и наблюдения.

2. Вследствие прямолинейности распространения света при любой форме рельефа найдутся углы наблюдения и облучения, при которых будут наблюдаться теневые, не облученные или слабо облученные прямой солнечной радиацией поверхности элементов рельефа. При этом радиационная температура пластины будет равна или близка к минимально возможной для заданных условий теплообмена, т. е. соответствовать отсутствию солнечной радиации.

3. Максимум радиационной температуры пластины имеет место, очевидно, при наблюдении облучаемой солнечной радиацией поверхности элементов рельефа, причем температура тем выше, чем больше радиус кривизны r облучаемой поверхности. В пределе, при $r \rightarrow \infty$ (плоская поверхность) и нормальным по отношению к поверхности направлением облучения, ее температура будет максимальной для данных условий теплообмена.

Ограничимся рассмотрением выпуклых элементов рельефа. В этом случае при неизменной площади основания элемента рельефа (площади его проекции на пластину) минимум максимального радиуса кривизны соответствует сферической поверхности и равен $(S/\pi)^{0.5}$. Дальнейшее уменьшение радиуса возможно только для части поверхности элемента рельефа, однако это приведет к увеличению радиуса кривизны другой ее части и в конечном итоге – к повышению максимальной по совокупности углов наблюдения и облучения радиационной температуры пластины.

Таким образом, радиационная температура рельефной пластины при низкой теплопроводности элементов рельефа, характерной для плохих проводников тепла и теплоизоляторов, определяется соотношением углов облучения и наблюдения. Ее минимальная по совокупности углов облучения и наблюдения радиационная температура не зависит от формы элементов рельефа и соизмерима с температурой пластины при отсутствии солнечной радиации. Максимальная радиационная температура пластины зависит от кривизны поверхности элементов рельефа. При заданной площади основания элементов минимум максимального значения температуры обеспечивается при их сферической форме и радиусе $r = (S/\pi)^{0.5}$.

Следовательно, в условиях изменчивости направлений излучения и наблюдения, что всегда имеет место на практике, предпочтительной формой элементов рельефа ССТК, обеспечивающей минимизацию максимума их контраста, является сфера с минимально возможным при заданной площади основания элемента радиусом.

Сферические элементы рельефа эффективнее рассмотренных выше цилиндрических. Оценка по формуле

$$\bar{T} = \int_0^{\pi/2} T_R(\phi) \sin 2\phi d\phi \quad (3)$$

показала, что контраст ССТК при нормальном облучении и наблюдении, когда наблюдаемая поверхность объекта вносит наибольший вклад в его заметность, составляет 13К, что на 4К ниже контраста ССТК с элементами рельефа цилиндрической формы. Примерно настолько же уменьшается контраст пластины со сферической формой элементов рельефа при изменении углов облучения и наблюдения, причем закономерности изменения контраста аналогичны таковым для цилиндрических элементов (рис. 2, 3). Это приводит к повышению эффективности сферических элементов при углах облучения β , близких к нулю, и ее снижению по сравнению с цилиндрическими элементами при углах облучения, близких к $\pi/2$. Наибольший выигрыш по эффективности элементы цилиндрической формы имеют при их облучении на направлениях, лежащих в параллельных образующим цилиндров плоскостях, так как в этом случае совмещаются положительные с точки зрения контраста свойства рельефных и плоских плоскостей. В сочетании с зависимостью интенсивности солнечной радиации от высот солнца вышеизложенные соображения обуславливают необходимость дифференцированного подхода к выбору формы элементов рельефа при снижении контраста различно ориентированных в пространстве поверхностей объектов.

При снижении контраста горизонтальных поверхностей объектов целесообразно использовать ССТК с элементами рельефа сферической формы, а вертикальных поверхностей – цилиндрической формы при вертикальной ориентации образующих элементов. Тогда при небольшой высоте h солнца (утренние часы) эффективность горизонтально расположенных ССТК с рельефной поверхностью ниже, чем с плоской, а вертикально расположенных с цилиндрическими элементами рельефа – выше, чем с плоской поверхностью, но ниже, чем со сферическими элементами. Однако в этом случае интенсивность солнечной радиации более чем на порядок меньше максимальной, за счет чего различия в эффективности ССТК практически отсутствуют. С увеличением высоты солнца облученность ССТК возрастает, но одновременно уменьшается угол облучения горизонтально расположенных ССТК (со сферическими элементами рельефа) и увеличивается – вертикально расположенных ССТК (с цилиндрическими элементами рельефа). При этом их эффек-

тивность возрастает и в пределе $h \rightarrow h_{\max}$ становится наибольшей по сравнению друг с другом и с ССТК с плоской поверхностью.

Рассмотрим тенденцию изменения температуры проекции элемента рельефа сферической формы (например, полушара) на направлении наблюдения при изменении его теплопроводности.

При коэффициенте теплопроводности $\lambda \rightarrow 0$ распределение температуры $T(\phi, \lambda)$ по поверхности полушара определяется дифференциальным (для элементарного участка поверхности) уравнением теплового баланса

$$\alpha [T(\phi, \lambda) - T_a] + \varepsilon \sigma T^4(\phi, \lambda) - \varepsilon E - (1 - a) \cdot E_{cm} \cos \phi = 0, \quad (4)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана, α – коэффициент конвективной теплоотдачи, T_a – температура атмосферы, E , E_{cm} – облученность поверхности излучением внешней среды и солнечной радиацией, a – альбедо поверхности, λ – коэффициент теплопроводности, ε – коэффициент излучения; а при $\lambda \gg 0$ – интегральным по полусфере

$$\int_0^{\pi/2} \left\{ \alpha [T(\phi, \lambda) - T_a] + \varepsilon \sigma T^4(\phi, \lambda) - \varepsilon E - (1 - a) E_{cm} \cos \phi \right\} \sin \phi d\phi = 0. \quad (5)$$

При бесконечной теплопроводности материала полушара температура его поверхности

$$T(\phi, \infty) = \text{const}, \quad \text{причем } T(0, 0) < T(\phi, \infty) < T\left(\frac{\pi}{2}, 0\right).$$

Так как температура в каждой точке поверхности полушара изменяется монотонно при изменении его теплопроводности, то приведенное условие свидетельствует о том, что существует угол $\phi = \phi_1$ такой, что $T(\phi, \lambda) < T(\phi, \infty) = \text{const}$, $0 \leq \lambda \leq \infty$. Из уравнений (4), (5) после несложных преобразований получим $\cos \phi_1 = 0,5$, т.е. для полушара угол постоянен и равен $\pi/3$.

Таким образом, при произвольном значении теплопроводности λ функция $T(\phi, \lambda)$ должна удовлетворять уравнению (5), а ее значения в каждой точке поверхности находятся на отрезке $[T(\phi, 0), T(\phi, \infty)]$.

Последнее позволяет представить решение уравнения (3.3) в виде

$$\begin{aligned} & \alpha T(\phi, \lambda) + \varepsilon \sigma T^4(\phi, \lambda) = \\ & = g(\lambda) [\alpha T(\phi, 0) + \varepsilon \sigma T^4(\phi, 0)] + \\ & + (1 - g(\lambda)) [\alpha T(\phi, \infty) + \varepsilon \sigma T^4(\phi, \infty)], \end{aligned} \quad (6)$$

где функция $g(\lambda)$ уменьшается от 1 до 0 при увеличении теплопроводности от нуля до бесконечности.

Непосредственной проверкой можно убедиться, что выражение (6) удовлетворяет уравнению (5).

В целях упрощения оценки зависимости температуры $\bar{T}$ от λ воспользуемся линейной аппроксимацией слагаемого σT^4 [2]:

$$\sigma T^4 = AT + B.$$

Максимальная разность температур в различных точках поверхности полушара составляет 30...40 К, поэтому с помощью такой аппроксимации

можно добиться погрешности вычисления температуры, не превышающей 0,5 К. Тогда с использованием формулы (1) получим

$$\bar{T}(\lambda) = g(\lambda) \bar{T}(0) + (1 - g(\lambda)) \bar{T}(\infty).$$

Из данной формулы видно, что при увеличении коэффициента теплопроводности (уменьшении величины $g(\lambda)$) температура $\bar{T}(\lambda)$ уменьшается, так как $\bar{T}(0) > \bar{T}(\infty)$. Следовательно, температура $\bar{T}(0)$ является гарантированной оценкой эффективности рассматриваемой формы рельефа поверхности ССТК.

Эта оценка верна для любых элементов рельефа со сферической или цилиндрической поверхностью. Отличие состоит лишь в увеличении угла ϕ_1 .

На основе проведенного анализа можно сформулировать следующие выводы:

при наличии облученности солнечной радиацией температура ССТК с рельефной поверхностью существенно отличается от температуры ССТК с плоской поверхностью. Это отличие обусловлено двумя причинами: увеличением, по сравнению с плоской поверхностью, площади эффективной теплоотдачи ССТК и неравномерностью распределения температуры по их поверхности. Степень влияния этих факторов определяется теплопроводностью рельефного слоя ССТК. При высокой теплопроводности основное влияние на температуру ССТК оказывает площадь теплоотдачи с их поверхности, при низкой – форма элементов рельефа ССТК;

степень влияния формы на контраст элемента рельефа ССТК зависит от изменчивости направления облучения ССТК солнечной радиацией. При фиксированном направлении предпочтительной является конусообразная либо пирамидальная форма элементов рельефа ССТК. В этом случае реализуются потенциальные возможности влияния формы элементов рельефа на их контраст, причем воздействие на него солнечной радиации может быть практически полностью компенсировано. Характерной особенностью рассматриваемого случая является независимость контраста элемента рельефа ССТК от теплопроводности его материала, что обусловлено равномерностью облучения поверхности конуса или пирамиды солнечной радиацией. При изменчивости направления облучения ССТК предпочтительной при снижении контраста горизонтальных поверхностей объектов является сферическая форма элементов рельефа ССТК, а вертикальных – цилиндрическая, обеспечивающие минимум их максимального по совокупности направлений облучения и наблюдения контраста. В этом случае эффективность ССТК зависит от теплопроводности рельефного слоя, причем ее максимум при совпадении направлений облучения и наблюдения имеет место при коэффициенте теплопроводности $\lambda \rightarrow \infty$.

В заключение необходимо отметить, что целью настоящей работы являлось выявление закономерностей влияния на эффективность ССТК собственно формы элементов рельефа их поверхности без учета ее взаимодействия с остальными характеристиками

ССТК. Вместе с тем в ряде практических случаев при высокой теплопроводности рельефного слоя максимальный эффект применения ССТК достигается в не зависимости от формы элементов рельефа. Это обусловлено тем, что форма и интенсивность конвективной теплоотдачи взаимодействуют в режиме взаимного исключения, т.е. при повышении теплоотдачи влияние формы стремится к нулю и наоборот. Устранить указанное противоречие можно только при комплексном учете влияния на эффективность ССТК формы элементов их пространственной структуры и теплофизических характеристик.

Литература

1. Костин, В.Д. Аналитический способ оценки радиационного контраста нагретых тел [Текст] / В.Д. Костин, В.Д. Мочалин // ОМП. - 1989. - № 7. С. 24-26
2. Мочалин, В.Д. Оценка температуры тел, находящихся в естественных условиях теплообмена с внешней средой [Текст] / В.Д. Мочалин, Г.Л. Тюрин // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. Сер. Радиотехника и система связи. - 2002. - Вып. 4.2. - С. 31-33.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (г. Воронеж)

MODELING AND ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF REDUCING THE THERMAL CONTRAST WITH REGARD TO THE SHAPE AND TOPOGRAPHY OF THE SURFACE

V.G. Kerkov, V.D. Mochalin, G.L. Tyurin

Regularities of influence of the form and contour of a surface of means of a drop of contrast in an infra-red range of lengths of waves on their efficiency are investigated, the preferable form of elements of a contour of means of a drop of contrast is justified

Key words: means of a drop of thermal contrast, temperature distribution, efficiency