СОДЕРЖАНИЕ

Физика

Адсорбция графена на поверхности (111) монооксида марганца и модуляция электронной	
рригоры силовым и электрическим полями	4
В.В. ИЛЯСОВ, И.І. ПОПОВА, И.В. Ершов.	4
Блияние химического состава на микроструктуру и фазовый состав малоуглеродистых	
и с п	10
Л.С. Печенкина	12
Влияние концентрации бора на мелкокристалличность структуры электрохимических композитов Ni-B-H	
А.В. Звягинцева	17
Электрофизические свойства металлооксидных пленок SnO ₂ , изготовленных по золь-гель	
С.А. Белоусов, А.А. Носов, Т.Г. Меньшикова, С.И. Рембеза	22
Информатика, вычислительная техника	
и управление	
Задача оптимизации дифференциальных систем с использованием сопряженных состояний	
С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов	26
О применении равномерного закона управления блоком чувствительных элементов для	
инершиальной навигационной системы с автокомпенсацией погрешностей	
С.В. Слесаренок. И.П. Шепеть. А.В. Захарин. В.И. Рубинов	35
Описание объектов изображения методами численной динамики	
Е.А. Ганцева. В.А. Калалзе. А.В. Шуляев	38
Разработка автоматизированной базы данных «Медико-социальная карта ребенка» для	
информационного сопровождения процесса реабилитации детей и подростков с	
ограниченными возможностями здоровья	
Т.А. Хорошева, М.А. Новосельцева	43

недостаточности у больных с оперированными приобретенными пороками сердца	
А.С. Трухачев, Е.Н. Коровин	47

Энергетика

Универсальный термодинамический цикл аксиально-поршневого двигателя внутреннего	
сгорания	
Э.Л. Топалов	52
Радиотехника и связь	
Аппаратная реализация цифрового демодулятора «в целом» кодированных	
фазоманипулированных сигналов	

pusonium jumpo bum bin em numob	
А.Н. Глушков, В.П. Литвиненко, А.А. Шафоростова	62
Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом:	
особенности конструктивно-технологического решения	
Н.А. Ус, С.П. Задорожний	65
Автоматическая калибровка многоразрядных КМОП-КНИ-ЦАП на источниках тока	
В.С. Кононов	72
Проектирование контроллера для 8-битного АЦП последовательного приближения с	
частотой выборки 75 МГц с использованием средств САПР САДЕМСЕ	
А.В. Строгонов, С.В. Жигульский, В.С. Пожидаев	75
Цифровой интерполирующий фильтр для быстродействующего цифро-аналогового	
преобразователя	
С.В. Калиниченко, В.П. Литвиненко, В.П. Дубыкин	78

Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом: особенности	
системы съема выходной информации	
Н.А. Ус, С.П. Задорожний, А.А. Авершин	82
Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой	
С.В. Дворников, С.С. Дворников, С.С. Манаенко, А.В. Пшеничников	87
Цифровой демодулятор сигналов с относительной фазовой манипуляцией	
А.Н. Глушков, Б.Н. Колбов, В.П. Литвиненко	94
Модель системы атмосферной оптической связи с пространственно-частотным	
разнесением	
Р.П. Краснов	97

Машиностроение и машиноведение

Получение требуемой микроповерхности при электрохимической размерной и комбинированной обработке

102
108
113
116
119
124

Физика

АДСОРБЦИЯ ГРАФЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ (111) МОНООКСИДА МАРГАНЦА И МОДУЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ СИЛОВЫМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЯМИ

В.В. Илясов, И.Г. Попова, И.В. Ершов

В рамках теории функционала плотности выполнено моделирование адсорбции графена на полярной поверхности (111) пластины монооксида марганца MnO, ограниченной с обеих сторон кислородом. Все поверхностные атомы кислорода пассивированы атомами водорода. Исследованы локальные атомные реконструкции границы раздела поверхностей графена и подложки MnO(111), а также их термодинамические и электронные свойства. Впервые изучены эффекты влияния адсорбции графена, силового и электрического полей на электронный спектр границы раздела графен/H:MnO(111). Определены эффективные заряды на атомах углерода и ближайшего окружения. Установлен перенос заряда от атомов ближайшего окружения к атомам углерода, который обусловливает п-допирование электронного спектра графена. Последнее открывает возможность создания графеновых полевых транзисторов п-типа. Показаны эффекты влияния внешнего поперечного силового и электрического полей на открытие энергетической щели между вершиной валентной полосы и дном зоны проводимости Ед в графене

Ключевые слова: графен, адсорбция, интерфейс графен/H:MnO(111), атомная и электронная структуры, силовое и электрические поля

Введение

Графен является важнейшей углеродной двумерной наноструктурой для создания устройств удивительным спинтроники благодаря их физическим свойствам [1,2]. За послелнее синтезированы десятилетие И исследованы графеновые слои, размещенные на поверхности металлов, диэлектриков и полупроводников. Графен, как материал с пониженной размерностью, при объединении его, например, с диэлектриками может представлять собой перспективный объект для создания таких устройств, как полевые транзисторы, сенсоры, спиновые фильтры и др. В качестве подложки для формирования новых квантовых свойств графена могут выступать магнитные изоляторы [3], к числу которых можно ультратонкие пленки отнести монооксида марганца. Ранее [4-6] были изучены особенности атомной и зонной структуры границы раздела между графеном и поверхностью (001) оксида марганца MnO для ферро- и антиферромагнитного упорядочений. На основе DFT расчётов структурной энергии системы графен/MnO(001) была установлена их стабильность и определена энергия химической связи.

В работе [7], с использованием расчетов в приближении DFT+U показано, что полярная поверхность MnO(111)₀, ограниченная атомами кислорода, обладает полуметаллической зонной структурой. К тому же поверхностные атомы кислорода приобретают отличный от нуля

Попова Инна Григорьевна – ДГТУ, старший преподаватель, e-mail: inna111109@rambler.ru

спиновый локальный магнитный момент, что обуславливает общую спонтанную намагниченность поверхности (111) монооксида марганца.

Отмеченные авторами работы [7] особенности представляют интерес с точки зрения перспектив использования данной поверхности в устройствах спинтроники, где необходимо реализовать спинзависимый транспорт электронов. Электронные свойства графена очень чувствительны к изменению внешних условий [8], к которым можно отнести также состояние поверхности подложки. Известно, что графен может адсорбироваться на ограниченных кислородом полярных поверхностях α -кварца [9] и заряд может перетекать как из графена к атомам интерфейса, так и в обратном направлении [10]. Подобный перенос заряда в интерфейсе графен-подложка приводит к p- или nдопированию зонной структуры графена [11,12]. Особый интерес привлекают квантовые свойства графена, обусловленные п-допированием его [11], зонной структуры что связано с возможностью создания графеновых полевых транзисторов n-типа. Отметим, что процессы адсорбции графена на полярной поверхности (111) монооксида марганца в антиферромагнитном упорядочении ранее не рассматривались. Выбор типа подложки играет исключительно важную роль модифицировании электронных свойств графеновых материалов.

В работе [13] впервые был изучен зонный спектр И краевой магнетизм одномерного графенового канала на гексагональном нитриде зависимости от внешних алюминия в разных электрических полей направлений. Показано, что наиболее ярко проявляется эффект поперечного электрического поля. Последнее позволяет в больших интервалах модулировать электронный спектр и величину энергетической

Илясов Виктор Васильевич – ДГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: <u>viily@mail.ru</u>

Ершов Игорь Владимирович - ДГТУ, канд. физ.-мат. наук, доцент, e-mail: iershov86@gmail.com

щели между вершиной валентной полосы и дном зоны проводимости Eg в точке Дирака для бигетероструктуры 4-ZGNR/AlNNS(0001) [13]. В присутствии поперечного электрического поля в нанолентах графена может наблюдаться переход полупроводник-полуметалл [13-16]. Энергетическая щель E_g в графеновых нанолентах

может быть индуцирована внешним электрическим полем [14,17-20] и (или) межслоевым сжатием [14,21,22].

Отмеченное выше позволяет предположить, эффекты, индуцированные электрическим что полем, одноосным сжатием И магнитной диэлектрической подложкой, контролирующие ширину энергетической щели в графеновых материалах еще недостаточно изучены. Нам представляется, что изменение структурных, и термодинамических свойств электронных результате взаимодействия графена в с диэлектрической магнитной подложкой MnO(111) заслуживает пристального внимания. В данной работе нами ИЗ первых принципов с использованием теории функционала плотности изучены адсорбция графена, структурные, электронные термодинамические свойства и возможности графен/Н:МnO(111), системы модулирования Е, эффектами внешних силовых и электрических полей.

1. Модель и метод

Теоретическая модель изучаемой системы графен/H:MnO(111) построена по схеме трехпериодической пластины. Мы использовали суперячейку из 58-х атомов, ограниченную монослоем атомов кислорода и содержащую элементарные ячейки (2х2) MnO в плоскости (111). Данная поверхность характеризуется чередованием атомных слоев кислорода со слоями марганца. При этом соседние слои марганца имеют противоположное направление спиновых магнитных моментов, что соответствует структуре антиферромагнетика. Нами использована пластина монооксида марганца MnO, ограниченная с обеих сторон кислородом. Ранее было теоретически показано [23], что изучаемая нами поверхность стабильна при высоких давлениях кислорода и является одной из возможных термодинамически форм существования стабильных полярных поверхностей MnO. Все поверхностные атомы кислорода с обеих сторон пластины пассивированы атомами водорода. На рис.1а приведен фрагмент моделирующей пластины, интерфейс графен/Н:МпО(111). Графен центрирован на атоме кислорода подложки, что соответствует связывающему положению над атомом кислорода. Данная конфигурация соответствует минимальной энергии по сравнению с другими связывающими положениями.

Пластина графен/Н:МпО(111):Н состоит из 12 неэквивалентных плоскостей в направлении [111]: 1-й плоскости графена, 4–х плоскостей марганца, 5ти плоскостей кислорода и 2-х плоскостей водорода.



Рис. 1. Фрагмент пластины, моделирующей интерфейс графен/H:MnO(111): (а) - вид сбоку, (b) - ориентация атомов углерода относительно атомов подложки, (c) - форма потенциала с периодом, равным периоду элементарной ячейки в направлении оси z, (d) - схема взаимного расположения исследуемой пластины и внешнего электростатического потенциала

Вакуумная щель выбиралась шириной 12 Å, что позволило исключить какое-либо взаимодействие между трансляциями пластины в направлении [111]. В настоящей работе выполнены самосогласованные расчеты полной энергии на основе теории функционала электронной плотности (DFT) с использованием приближения псевдопотенциала (код Quantum-Espresso) [24]. Для обменно-корреляционной энергии были использованы функционалы в форме РВЕ в рамках приближения (GGA) [25,26]. Для плоских волн, использованных в разложении псевдоволновых функций, энергия обрезания составляла 952 эВ. При расчете всех поверхностей была использована схема генерации к-точек по методу Монкхорста-Пака с плоской сеткой размерностью 9х9х1. Была достигнута сходимость по полной энергии ячейки не хуже 10⁻⁶ Рид/яч. Для описания взаимодействия валентных электронов с остовом мы использовали ультрамягкие псевдопотенциалы в параметризации Вандербильта. Построение псевдопотенциалов осуществлялось с использованием наиболее надежной схемы Труллера-Мартинса [27]. Использовались следующие электронные конфигурации для атомов: Mn – [Ar]3s²3p⁶d⁵, О – [He]2s²2p⁴, С – [He]2s²2p². Состояния [Ar] и [Ne] относятся к остовным.

Известно что локальные [28,29], и полулокальные приближения для описания обменной и корреляционной энергии (LDA, GGA, в т.ч. и РВЕ) в рамках DFT неспособны корректно описать дисперсионное взаимодействие, которое имеет место в слоистых структурах аналогичных рассматриваемым здесь. Согласно [29],

обусловлено дисперсионное взаимодействие исключительно нелокальными динамическими корреляционными эффектами, для расчетов в рамках DFT не имеет смысла использовать и гибридные обменно-корреляционные функционалы, поскольку в них учитывается только нелокальный (Хартри -Фока) обмен. В работе мы учитывали ван-дер-ваальсовое взаимодействие в нашей системе в рамках DFT благодаря использованию полуэмпирического потенциала вида $C_6 R^{-6}$, введенного в функционал полной энергии (DFT-D2) согласно [28]: $E_{DFT-D} = E_{DFT} + E_{disp}$. При расчетах методом DFT-D2 мы использовали хорошо известный обменно-корреляционный функционал РВЕ с дисперсионной поправкой (PBE-D2) аналогично работе [29]. Для более корректного описания 3dсостояний металла Мп в структуре оксида вводилась хаббардовская поправка U = 6 эВ аналогично работе [23]. Влияние нижней поверхности пластины на зонную структуру было сведено к минимуму при помощи пассивации атомами водорода, т.е. нами рассматривалась подложка типа Н:МпО(111):Н.

Взаимодействие электронов с внешним электростатическим полем (в направлении оси «z») определяется следующим выражением аналогично [30,31]:

$$U_{ext}(r) = |e| E \cdot r$$

Обозначение U используется для того, чтобы отличать потенциальную энергию в электростатическом поле от любых других потенциальных членов Кона-Шэма

$$\left(V_{KS}(r) = \int dr' \frac{n(r')}{|r-r'|} + V_{ion}(r) + V_{xc}(r)\right).$$
 Тогда

уравнения Кона-Шэма с учетом внешнего электрического поля можно переписать в виде [30]:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V_{KS} + U_{ext}\right)\psi_i(\mathbf{r}) = \varepsilon_i\psi_i(\mathbf{r}) + \varepsilon_i\psi_i(\mathbf{r}) +$$

Приложенный электростатический потенциал меняется линейно вдоль всей элементарной ячейки, поэтому для выполнения периодических граничных условий необходимо скомпенсировать его для того, чтобы восстановить исходное значение на границе ячейки. Для этих целей лучше всего подходит пилообразная форма потенциала с периодом. равным периоду элементарной ячейки в направлении оси z (см. рис. 1с). Схема взаимного расположения исследуемой пластины и внешнего электростатического потенциала приведена на рис. 1d. Откуда следует, что если внешнее электрическое поле Eext существует в интервале от 0 до l, а размер моделируемой ячейки составляет L вдоль направления оси «у», то компенсирующее поле Е^{*} определяется аналогично [30]:

$$\mathbf{E}^* = -\mathbf{E}_{\mathsf{ext}} \, \frac{1}{\mathbf{L}} \, \cdot \,$$

Знак «-» показывает, что направление Е^{*} всегда противоположно направлению E_{ext}.

Энергия адсорбции атома кислорода в системе графен/Н:МпО(111) определялась на основе соотношения [32]

$$E_{ads} = \left(E_{slab+SLG} - E_{slab} - E_{SLG}\right) / N$$

где $E_{slab+SLG}$ – полная энергия суперячейки с интерфейсом, E_{slab} – полная энергия элементарной ячейки подложки, E_{SLG} - энергия графена, N - число атомов углерода в расчетной ячейке графена.

На основе анализа заселённости по Левдину [33] определялись эффективные заряды на атоме углерода и ближайших к нему поверхностных атомах водорода, кислорода и марганца для системы графен/H:MnO(111).

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Атомная структура и энергия адсорбции графена на гидрированной поверхности MnO(111)

На первом этапе изучены особенности атомной структуры границы раздела между графеном и подложкой MnO(111), ограниченной кислородом. Для этого была проведена релаксация двух монослоев графена и водорода и двух верхних двойных атомных слоев (Mn, O) пластины монооксида марганца. Первоначально графен помещался на расстоянии 2 Å от поверхности H:MnO(111):Н. Нижние два двойных слоя (Mn, O) и один слой водорода снизу в системе 2D графен/Н:МnO(111) были «заморожены». Релаксация осуществлялась до тех пор, пока сумма всех сил действующих в системе не становилась эB/Å. меньше 0,001 Атомная структура четырехслойной пластины с графеном для четырех конфигураций различных системы графен/H:MnO(111) после релаксации, представлена на рис. 1. Установлены равновесные параметры решеток, атомные позиции атомов углерода в графене и атомов верхних двух двойных слоев монооксида марганца. Определены длины связей между атомами углерода в графене, дистанции между парами атомов интерфейса в верхних слоях пластины оксида марганца для системы графен/Н:МпО(111) после релаксации. Длина связи между атомами углерода и кислорода составила величину $d_{C-O} = 3,40$ Å, что согласуется с опубликованными данными d_{C-O} =3,36 Å [34] d_{C-O}=3,4 Å [35]. Дистанция между графеном и слоем водорода в интерфейсе составила величину 2,47 Å. Расстояние по вертикали между верхним слоем кислорода и слоем марганца составило величину b = 1,24 Å в системе графен/H:MnO(111).

Гидроксильные группы (ОН) были ориентированы перпендикулярно поверхности интерфейса, как это показано на рис. 1а. Длина О-Н-связей составляла $d_{O-H} = 0,96$ Å для всех рассмотренных здесь конфигураций. Для рассматриваемой пары атомов разница кислорода водорода И электроотрицательностей (ЭО) составляет 1,24 Х [36], а длина связи d_{O-H} была сопоставима с длиной водородной H-O-связи в воде (0,96 Å [37]). Отмеченное выше соответствует физическим представлениям о водородной связи [38] и позволяет отнести моделируемую в данной работе *d*_{*H-O*}-связь к водородному типу. Для системы графен/Н:МпО(111) усредненная длина С-С-связи для атомов углерода в графене составила 1,37 Å, что указывает на ee деформацию рассматриваемой суперячейке с подложкой. Величина деформация длины С-С-связи составила 3,5 % и не оказывает существенного влияния на зонный спектр графена в области малых энергий.

Природа перестройки атомной структуры в интерфейсе графен/Н:МпО(111), связанная с адсорбцией графена на поверхности интерфейса, может быть понята при детальном изучении термодинамики И электронной структуры рассмотренной модели адсорбции графена. Результаты изучения взаимодействия между и диэлектрической графеном поверхностью приведены в табл. 1.

Таблица 1 Энергия адсорбции E_{ads} графена на кристаллических подложках, дистанция между графеном и подложкой d_{C-R} , эффективные заряды на атомах углерода (графена) δO_{c} и ближайшего окружения δQ_{NNr}

		νc				- 11110
Фаза	$\frac{E_{ads}}{eV},$	<i>d</i> _{<i>C-R</i>} , Å	<i>δQ_C</i> , e	$\delta Q_{_{NNr}}$, e	Method	Источник
SLG/H: MnO(111) ₀	0,051	3,40	0,019	-0,55(O), -0,06 (4H)	PBE-D2	н.р.
SLG/MnO (111) _O	0,086	2,69	0,030	-0,42 (O)	PBE-D2	н.р.
SLG/MnO (111) ₀	0,034	3,19	-	-	PBE	н.р.
SLG/Al ₂ O ₃ (0001) _{Al}	0,040	2,92	-	-	PBEsol	[39]
SLG/алмаз (111)	0,69	1,62	-	-	MNDO (PM7)	[40]
SLG/Al ₂ O ₃ (0001) ₀	0,11- 0,13	2,7- 2,9			LDA	[41]
ZGNRs/AIN NS(0001)	0,060	3.20	0.132	+1.12(Al), -1.05(N)	PBE-D2	[13]
ZGNRs/h- BN(0001)	0,074	3.12			PBE-D2	[42]

Анализ результатов табл. 1 показывает, что использование приближения PBE-D2 для описания обменной и корреляционной энергии оправдано и дает сопоставимые значения для энергии адсорбции графена на диэлектрических и полупроводниковых подложках [13,39-42]. Наши DFT расчеты показали, что приближения PBE и PBEsol дают заниженное значение энергии адсорбции графена на диэлектрической поверхности 0,034 эВ/атом и 0,040 эВ/атом соответственно. Для непассивированной поверхности изучаемого интерфейса энергия адсорбции оказывается в 1,7 раз выше, чем для пассивированной поверхности интерфейса. Данное различие энергий адсорбции может быть связано с разной дистанцией между слоями графена и кислорода (см. табл.1). Значение энергии адсорбции графена (0,086 эВ/атом) в системе графен/MnO(111) без пассивации интерфейса согласуется с оценкой (0,11 эВ/атом [41]) для графен/Al₂O₃(0001), системы ограниченной кислородом. Отметим, системе что в графен/алмаз(111) энергия адсорбции составляла величину на порядок большую ($E_{ads} = 0,69$ эВ/атом [40]), чем в данной работе. Данное различие может быть обусловлено малой дистанцией ($d_0 = 1,62$ Å [40]) по вертикали между графеном и гранью (111) алмаза, для которых характерен ковалентный тип связи.

Для лучшего понимания процессов хемосорбции следует изучить распределение эффективных зарядов на атомах интерфейса графен/Н:МпО(111) для случая гидрирования. Результаты DFT расчетов эффективных зарядов на атомах углерода И ближайших к нему поверхностных атомах водорода, кислорода и марганца для рассмотренных конфигураций систем графен/Н:МпО(111) приведены в табл. 1. Анализ данных табл. 1 позволяет отметить существование общей тенденции переноса заряда от атомов углерода к атомам интерфейса (водорода и кислорода), как это имело место в работах [10, 21]. Наблюдается перенос заряда от атомов марганца к атомам кислорода верхнего слоя. В общем случае, перенос заряда определяет механизмы процессов хемосорбции графена на полярной поверхности (111) и обусловлен существенным различием электроотрицательностей атомов марганца (1,55 X), кислорода (3,44 X), углерода (2,55 X), и водорода (2,20 X) [36]. Однако известно [41], что в условиях слабого взаимодействия переносом заряда в физической интерфейсе управляет механизм сорбции и процесс переноса заряда будет происходить достижения равновесия до химических потенциалов графена и подложки H:MnO(111) при их совмещении.

2.2. Индуцированная эффектами силового и электрического полей электронная структура системы графен/Н:МпO(111)

Для более глубокого понимания возможностей управления открытием запрещенной полосы E_g в графене в составе системы графен/H:MnO(111) мы рассчитали зонную структуру для пяти вариантов, определяющих

характер воздействия силовым и электрическим полями. На рис. 2 а,b представлена зонная структура системы графен/Н:MnO(111) и графена без подложки в отсутствие воздействия со стороны силового и электрического полей.



Рис. 2. Зонная структура (a,c,d,e,f) системы графен/H:MnO(111) и графена (b) без подложки для обоих спинов: (a,b) в отсутствии полей; при наличии внешнего электрического поля (c,d) противоположных направлений; при межслоевом сжатии на величину 0.25 d_0 (e) и 0.5 d_0 (f) соответственно. Во всех случаях интерфейсная поверхность кислорода гидрирована монослоем водорода, а уровень Ферми соответствует нулю энергии

В настоящей работе изучается зонный спектр системы графен/Н:МпО(111) в окрестности уровня Ферми и, в частности, энергетическое положение вершины конуса Дирака. Линейный закон дисперсии в вершинах π -зон (в точке Дирака) сменился на параболический, что говорит о появлении конечных эффективных масс носителей аналогично [43]. Кроме того, данные зоны смещены по энергии вниз относительно уровня Ферми в графене без подложки. Данный факт указывает на то, что несмотря на слабое связывание графена с подложкой (_{Е аds} = 0,051 эВ/атом), это взаимодействие управляет переносом заряда в интерфейсе рассматриваемой системы. В свою очередь, перенос заряда в интерфейсе сдвигает уровень Ферми относительно вершины конуса Дирака и контролируется каналом работы выхода подложки [11,12]. Представленную на рис. 2

зонную структуру графена на магнитном изоляторе (диэлектрике) можно

интерпретировать как сдвиг уровня Ферми вверх относительно вершины конуса Дирака в графене без подложки (см. рис. 2b). Согласно [11], сдвиг уровня Ферми Е_F в графене определяется как $\Delta E_F = E_F - E_D$, где E_D - середина E_g графена, адсорбированного на поверхности монооксида марганца MnO(111). Подобное рассмотрение позволяет утверждать, что допированный графен (+0.20 е) имеет зонную структуру полупроводника n-типа. Отмеченное явление может быть связано с различием работ выхода графена и поверхности монооксида MnO(111), как это имело место в интерфейсе графен/металл [30,33]. Поэтому нами, на основе DFT расчетов, изучено влияние гидрирования на величину работы выхода адсорбированного графена И О-полярной поверхности интерфейса, как пассивированной, так и не пассивированной. Результаты DFT расчетов работы выхода представлены в табл. 2.

Таблица 2 Ширина E_g , работа выхода электронов с поверхности графена W_G и подложки W_S , сдвиг уровня Ферми ΔE_F , дистанция по вертикали между графеном и подложкой d_0 в системе графен/H:MnO(111) при воздействии силового и электрического полей

E _g	W_{G}	W _s	ΔE_{F}	Сред- няя диста- нция $d_{_0}$	Элек- три- чес- кое поле	Меж- слоевое сжатие (дефор- мация)
		эB		Å	В/нм	%
мэВ						
0,4	3,93	1,83	0,09	3,33	нет	нет
0,5	3.30	-	0,34	3,33	+1,0	-
0,4	3.87	-	0,04	3,33	-1,0	-
0,6	3.91	-	0,15	2,73	-	25
3,2	4.02	-	0,07	1,66	-	50

Анализ табл. 2 показал, что полярная (111)подложки, ограниченной поверхность кислородом имеет работу выхода $W_S = 7,72$ эВ, что удовлетворительно согласуется с данными (8,9 эВ) работы [43]. Работа выхода электронов с поверхности полностью гидрированного верхнего слоя кислорода составила всего $W_s = 1,83$ эВ. Работа выхода электронов с поверхности не адсорбированного графена $W_G = 4.50$ эВ, что согласуется с известнвми значениями (4,58 эВ [37]). При адсорбировании графена на гидрированный слой кислорода подложки H:MnO(111) работа электронов с поверхности графена выхода понизилась и, в отсутствии внешних силовых и электрических полей, составила величину $W_G =$ 3,93 эВ. Накладывание внешних электрических

полей провивоположных направлений вдоль оси z (рис. 1 приводит к дальнейшему понижению величины работы выхода адсорбированного графена (см. табл. 2). При межслоевом сжатии системы графен/H:MnO(111) на величину 0.25 *d*₀ и

 $0.5 d_0$ соответственно работа выхода электронов с поверхности графена незначительно уменьшается в первом случае и увеличивается во втором случае.

Результаты DFT расчетов ширины энергетической щельи между вершиной валентной зоны проводимости полосы И ДНОМ Eg представлены в табл. 2. Откуда следует, что зонная структура графена содержит очень маленькую величину E_g , величина которой может меняться в интервале от 0,4 мэВ до 3,2 мэВ. Однако, с возрастанием приложенного внешнего электрического поля до значений $E_{ext} = 1$ V/nm величина E_g возрастает в 1,25 раза, составляя E_g = 0,5 мэВ. При изменении направления электрического поля на противоположное, величина Е, не меняется. Более ярко проявляется приложение силового поля. В частности, в случае межслоевого сжатия системы графен/подложка на четверть первоначальной дистанции d_0 , ширина E_g увеличивается в 1,5 раза, составляя величину $E_g = 0,6$ мэВ. При межслоевом сжатии на $0,5 d_0$ E_g увеличивается в 8 раз, составляя ширина величину E_g = 3,2 мэВ. Следует подчеркнуть, что несмотря на малые значения ширина энергетической щели между вершиной валентной полосы и дном зоны проводимости E_g может быть промодулирована несколько в раз при использовании эффектов силового И электрического полей. При переходе от двумерного графенового канала к одномерному каналу, что обычно имеет место в полевых транзисторах, рассматриваемые эффекты могут быть усилены квантоворазмерным эффектом И эффектом подложки [45,46]. Однако, это тема отдельного нашего исследования.

Отметим, что пассивирование интерфейса водородом приводит к существенному изменению его электронных свойств, в частности, к уменьшению в 1,2 раза и в 4,2 раза величин работ электронов поверхности выхода с адсорбированного графена И поверхности монооксида марганца соответственно (см. табл. 2). Важно, что процесс гидрирования интерфейса до степени покрытия $\Theta = 1,0$ MC позволяет получить новое физическое свойство – полупроводник птипа. Последнее подтверждается знаком сдвига уровня Ферми ΔE_F относительно уровня Ферми графена без подложки (см. табл. 2). Особенно

важно, что эффекты силового и электрического полей сохраняют это свойство, что открывает возможность создания графеновых полевых транзисторов n-типа и представляет значительный интерес для наноэлектроники.

Заключение

Таким образом, используя первопринципные расчеты на основе теории функционала плотности, мы изучили локальную атомную структуру, адсорбцию графена и электронные свойства интерфейса системы графен/H:MnO(111), обусловленные взаимодействием графена и гидрированной границы раздела.

Изучение природы связи между графеном и магнитным изолятором позволило впервые получить оценки энергии адсорбции в интерфейсе графен/*H*:*MnO(111)*. Взаимодействие между графеном и магнитным изолятором осуществляется по механизму физической сорбции. Нами показано, что использование приближения PBE-D2 для описания обменной и корреляционной энергии оправдано и дает сопоставимые значения для энергии адсорбции графена на диэлектрических и полупроводниковых подложках [13,39,42].

В настоящей работе было показано, что гидрирование интерфейса приводит к существенному изменению его электронных свойств, в частности возникает новое качественное состояние – полупроводник п-типа. Следует отметить, что эффекты силового и электрического полей сохраняют это свойство. Последнее открывает возможность создания графеновых полевых транзисторов п-типа, что позволяет предположить высокие потенциальные возможности использования этой системы в спинтронике.

Литература

1. Галашев, А.Е. Устойчивость графена и материалов на его основе при механических и термических воздействиях [Текст] / А.Е. Галашев, О.Р. Рахманова // Успехи физических наук. – 2014. – Т.184, № 10. – С. 1045-1065.

2. Fiori, G. et. al. Electronics based on twodimensional materials / G. Fiori et. al. // Nature Nanotechnology. – 2014. – V.9. – P. 768-779.

3. Wang, Zh. Proximity-induced ferromagnetism in graphene revealed by the anamalous Hall effect / Zh. Wang, Ch. Tang, R. Sachs, Ya. Barlas and J. Shi // Phys. Rev. Lett. – 2015. – V.114. – P. 016603.

4. Илясов, В.В. Первопринципные расчеты параметров химической связи и зонной структуры двумерной системы графен/MnO(001) [Текст] / В.В. Илясов и др. // Журнал структурной химии. – 2011. – Т.52, № 5. – С. 879-890.

5. Илясов, В.В. Локализованные электронные состояния и магнитные свойства в интерфейсе двумерной системы графен/МпО(001) [Текст] / В.В. Илясов, И.В. Ершов, И.Я. Никифоров и др. //

Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2011. – № 8. – С. 50-60.

6. Ilyasov, V. Materials for spintronics: magnetic and transport properties of ultrathin (monolayer graphene)/MnO(001) and MnO(001) films / V. Ilyasov, B. Meshi, A. Ryzhkin et al. // Journal of Modern Physics. – 2011. – V.2. – P. 1120-1135.

7. Ершов, И.В. *Аb initio* изучение полуметалличности полярной поверхности MnO(111) [Текст] / И.В. Ершов, И.Г. Попова, В.В. Илясов // Труды конф. ODPO-17. – 2014. – Т.1. – С.125-128.

8. Craciun, M.F. Trilayer graphene is semimetal with a gate-tunable band overlap / M.F. Craciun, S. Russo, M. Yamomoto et al. // Nature Nanotechnology. -2009. - V.4. - P. 383-388.

9. Kang, Y.-J. Electronic structure of graphene and doping effect on SiO2 / Y.-J. Kang, J. Kang and K.J. Chang // Phys. Rev. B. – 2008. – V.78. – P. 115404 - 115408.

10. Hossain, M.Z Chemistry at the graphene-SiO₂ interface / M.Z. Hossain // Appl. Phys. Lett. - 2009. - V.95. - P. 143125-3.

11. Zheng, Jiaxin. Interfacial properties of bilayer and trilayer graphene on metal substrates / Jiaxin Zheng et al. // Scientific reports – doi: 10.1038/srep02081.

12. Khomyakov, H.M. First-principles study of the interaction and charge transfer between graphene and metals / H.M. Khomyakov, G. Giovannetti, P.C. Russi et al. // Phys.Rev. B. -2009. -V.79. -P. 195425 (12).

13. Ilyasov, V.V. Effect of electric field on the electronic and magnetic properties of graphene nanoribbon/aluminium nitride bilayer system / V.V. Ilyasov, V.C. Nguyen, I.V. Ershov, Nguyen N. Hieu // RSC Advances. et al. – 2015. – V.5. – P. 49308-49316.

14. Guo, Y. Semiconducting to half-metallic to metallic transition on spin-resolved zigzag bilayer graphene nanoribbons / Y. Guo, W. Guo, and C. Chen // Phys. Chem. C. -2010. - V.114. - P. 13098.

15. Son, Y.W. Half-metallic graphene nanoribbons / Y.W. Son, M.I. Cohen, S.G. Louie // Nature. – 2006. – V.444. – P. 347.

16. Dutta, S. Intrinsic half-metallicity in modified graphene nanoribbons / S. Dutta, A.K. Manna, S.K. Pati // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V.102. – P. 096601.

17. Zhang, Z. Generation of coherent radiation by magnetization reversal in grapheme / Z. Zhang, C. Chen, X.C. Zeng, W. Guo // *Phys. Rev. B.* – 2010. – V.81. – P. 155428.

18. Li, T.S. Transport properties of AB-stacked bilayer graphene nanoribbons in an electric field / T.S. Li, Y.C. Huang, S.C. Chang, Y.C. Chuang, M.F. Lin // *Eur. Phys. J.* B. - 2008. - V.64. - P. 73.

19. Kim, G. Spin-polarized energy-gap opening in asymmetric bilayer graphene nanoribbons / G. Kim, S.-H. Jhi // *Appl. Phys. Lett. B* - 2010. - V.97. - P. 263114.

20. Yang, Z. Strain and electric field co-modulation of electronic properties of bilayer boronitrene / Z. Yang, J. Ni // *Appl. Phys. Lett. B* – 2010. – V.107. – P. 104301.

21. Guo, Y.F. <u>Bias voltage induced n-to p-type</u> transition in epitaxial bilayer graphene on SiC / Y.F. Guo, W.L. Guo, C. F. Chen // *Phys. Rev.* – 2009. – V.80. – P. 085424.

22. Guo, Y.F. <u>Tuning field-induced energy gap of bilayer graphene via interlayer spacing</u> / Y.F. Guo, W.L. Guo, C. F. Chen // *Appl. Phys. Lett. B* – 2008. – V.92. – P. 243101.

23. Franchini, C. Density functional study of the polar MnO,,111 surfac / C. Franchini et al. // Phys. Rev. B. – 2006. – V.73. – P. 155402-155416.

24. Giannozzi, P. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials / P. Giannozzi, S. Baroni, N. Bonini et al // Phys.: Condens. Matter. – 2009. – V.21. – P. 395502-1-39.

25. Perdew, J. P. Generalized Gradient Approximation Made Simple / J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof // Phys. Rev. Lett. – 1996. – V.77. – P. 18-3865-3868.

26. Perdew, J. Restoring the Density-Gradient Expansion for Exchange in Solids and Surfaces /J. Perdew, A. Ruzsinszky, G.I. Csonka et al. // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V.100. – P. 136406 - 136409.

27. Troullier, N. Efficient pseudopotentials for planewave calculations / N. Troullier and J. L. Martins // Phys. Rev. B. -1991. - V.43. - P. 1993-2006.

28. Grimme, S. Accurate description of van der Waals complexes by density functional theory including empirical corrections / S. Grimme // J. Comput. Chem. -2004. - V.25(12). - P. 1463.

29. Ilyasov, V.V. Electric field and substrate-induced modulation of spin-polarized transport in graphene nanoribbons on A3B5 semiconductors // V.V. Ilyasov, C.V. Nguyen, I.V. Ershov et al. // J. Appl. Phys. – 2015. – V.117. – P. 174309-1-8.

30. Ilyasov, V.V. Tuning the band structure, magnetic and transport properties of the zigzag graphene nanoribbons/hexagonal boron nitride heterostructures by transverse electric field / V.V. Ilyasov, B.C. Meshi, V.C. Nguyen et al. // J. Chem. Phys. – 2014. – P.141.

31. Chun-Wei, Chen. Band gap modification of singlewalled carbon nanotube and boron nitride nanotube under a transverse electric field / Chun-Wei Chen, Ming-Hsien Lee and S.J. Clark. // Nanotechnology – 2004. – V.15. – P. 1837.

32. Roberto, C. Nature of adsorption on TiC(111) investigated with density-functional calculations / C. Roberto, and B.I. Lundqvist // Phys.Rev. B. – 2007. – V.75. – P. 235438-1-31.

33. Löwdin, P. On the Nonorthogonality Problem / P. Löwdin // Adv. Quant. Chem. – 1970. – V.5. – P. 185-199.

34. Shemella, P. Electronic structure and band-gap modulation of graphene via substrate surface chemistry / P. Shemella and Nayak S.K. // Appl. Phys. Lett. -2009. - V.94. - P.032101-1-3.

35. Fan, X.F. Interaction between graphene and the surface of SiO₂ /X.F. Fan, W.T. Zheng, V. Chihaia, Z.X. Shen, Jer-Lai Kuo // J. Phys.: Condens. Matter. – 2012. – V.24. – P. 305004-1-10.

36. Трофимов М.И., Смоленский Е.А. // Известия Академии наук, серия химическая. – 2005. - С. 2166-2176.

37. Уэллс, А. // Структурная неорганическая химия. - М.: Мир. - 1987. - Т.2. - С. 696.

38. Денисов, Г.С. Водородная связь / Г.С. Денисов, Н.Д. Соколов // Химическая энциклопедия. – М.: Сов. Энциклопедия. - 1988. – Т.1. – С. 403-404.

Энциклопедия. -1988. – Т.1. – С. 403-404. 39. Ilyasov, V.V. Surface States and Adsorption Energy of Carbon in the Interface of the Two Dimensional graphene/Al2O3(0001) System / V.V. Ilyasov and I.V. Ershov // Physics of the Solid State. – 2012. – V.54, № 11. – P. 2332–2340.

40. Svechnikov, A.B. Adsorbed layers of graphene on crystallin substrates // <u>www.ivtn.ru/2012/pdf</u>.

41. Entani, Sh. Contracted interlayer distance in graphene/sapphire heterostructure / Antipina L.Yu., Avramov P.V. et al. // Nano Res. DOI: 10.1007/s12274-014-0640-7.

On-line: <u>http://www.thenanoresearch.com</u> on November 19, 2014.

42. Ilyasov, V. V. Edge and substrate-induced bandgap in zigzag graphene nanoribbons on the hexagonal boron nitride 8-ZGNR/h-BN(0001) / V.V. Ilyasov, B.C. Meshi, V.C. Nguyen, I.V. Ershov, D.C. Nguyen // AIP Advances. – 2013. – V.3.- P. 092105-1-9

43. Илясов, В.В. Физика интерфейса планарных углеродных наноструктур [Текст] / В.В. Илясов, И.В. Ершов // Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. – 2013. – С. 260.

44. Gorkem, Gunbas et at. // Nature Chemistry. - 2012. – V.4. – P. 1018-1023.

45. Giovanetti, G.; Khomyakov P.A.; Brocks G.; Kelly D.J.; Brink // J. Phys. Rev. B: Condens. Matter. -2007. - V.76. - P. 073103.

46. Ilyasov V.V. Magnetism and transport properties of zigzag graphene nanoribbons/hexagonal boron nitride heterostructures / V.V. Ilyasov, B.C. Meshi, V.C. Nguyen, I.V. Ershov, D.C. Nguyen // Journal of Applied Physics. – 2014. – V.115. – P. 053708-1-6.

47. Дисперсионное взаимодействие // Химическая энциклопедия. Т.2. – М.: Советская энциклопедия. - 1990. – С. 78.

48. Meyer, B. Density-functional study of the structure and stability of ZnO surfaces / B. Meyer, D. Marx // Phys. Rev. B. -2003. - V.67. - P. 035403.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

ELECTRONIC STRUCTURE AND ADSORPTION OF GRAPHENE ON POLAR MNO SURFACE

V.V. Ilyasov, I.G. Popova, I.V. Ershov

Simulation of single-layer graphene adsorption on (111) oxygen-terminated polar MnO surface was performed within DFT framework. Surface oxygen atoms were completely passivated by hydrogen. Local atomic reconstructions of graphene-MnO(111) interface and its thermodynamic and electronic properties were studied. The effects of force and electric fields on electronic spectrum of the graphene/H:MnO(111) interface were studied for the first time. The effective charges on carbon and immediate neighborhood atoms were found. The charge transfer from the surface to graphene was determined which leads to n-doping of graphene electron spectrum. The latter provides the opportunity of creation of graphene n-type FET. The work demonstrates the effects of external transversal force and electric fields on the band gap opening in graphene

Key words: graphene, adsorption, graphene/H:MnO(111), atomic and electronic structure, force and electric fields

УДК 669.13.018 ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Л.С. Печенкина

Приведены результаты исследования влияния легирующих элементов на структурообразование самозакаливающихся белых чугунов

Ключевые слова: белый чугун, хром, ванадий, легирование, композиционная структура

Объектом исследования являются комплексно-легированные белые чугуны для износостойких тонкостенных отливок, которые обладают необходимыми прочностью и ударной вязкостью без упрочняющей термической обработки. Но при изготовлении отливок из таких сплавов сложной конфигурации в процессе формирования мартенситно-карбидной структуры могут появиться микротрещины. Повышение ударной вязкости чугунов возможно более полным приближением структуры к композиционному виду. Поэтому задача исследования - оценка условий структурообразования, обеспечивающих формирование композиционной структуры сплавов. При планировании работы в качестве базовой была заложена микроструктура кристаллизующегося сплава, состоящая из разреженной двойной эвтектики А + МС, где А- аустенит, МС- карбид металла. Проведенные теоретические и экспериментальные расчеты показали, что в качестве базового может быть использован сплав следующего химического состава, %: 1,8-2,2 С; 2,5-4 Mn; 6-7 Cr; 6,5-8 V; до 1 Si [1]. При таком составе можно обеспечить сбалансированное содержание углерода и ванадия с целью исключения из структуры эвтектики других карбидных фаз, кроме карбида МС. Известный композиционный характер такой структуры должен обеспечить сочетание высоких механических и эксплуатационных свойств [2,3].

Значительное влияние на фазовый состав металлической основы (матрицы) сплава оказывает марганец. Совместно с хромом он сильно повышает прокаливаемость сплава, увеличивая количество мартенсита в структуре. Однако наряду с этим он способствует и сохранению в структуре остаточного аустенита.

Количество аустенита в структуре сплавов определялось с помощью рентгеноструктурного анализа по специальной методике в зависимости от химического состава, который выражался в виде обобщенного параметра - параметра аустенизации Π_{A} [4]:

 $\Pi_{A} = C + Mn + 0.5Cr + 0.2V - 0.5Si + 0.5Mo + +0.2Cu - 0.5Al$ (1)

Экспериментально исследованы 5 сплавов, химические составы которых, их параметры аустенизации и количество аустенита в структуре приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер		Содержан		Π_{A} , %	A, %		
сплава	С	Mn	Cr	V	Si		
2	1,46	1,90	5,6	5,1	0,64	6,85	11,0
9	1,75	5,10	7,6	6,2	1,06	11,37	53,5
12	1,90	0,85	5,5	5,9	0,43	6,43	9,5
20	2,28	5,50	7,3	6,8	0,7	12,46	78,3
M1 ^{*)}	1,42	2,19	4,4	2,93	1,02	6,58	10,0
*) D M1	1	1240/C	0.060/N	[

Характеристики химического состава и структуры экспериментально исследованных сплавов

*) В сплаве M1 содержится также 1,24% Cu и 0,96% Mo.

Компьютерная обработка этих данных подтвердила экспоненциальный характер зависимости количества аустенита от концентрационного параметра аустенизации (рис.1).

Эта зависимость применительно к исследованным сплавам для условий естественного структурообразования (охлаждение в литейной форме по газифицируемым моделям до ~ 700°C с последующей горячей выбивкой и дальнейшем охлаждении на воздухе) имеет следующий вид:

$$A = \exp(0.35 \cdot \Pi_A);$$
 (2)

где А – количество аустенита;

П_А – параметр аустенизации; обе величины выражаются в мас. %.

Параметр аустенизации для всех исследованных сплавов рассчитан по уравнению (1) вместе с характеристиками структуры, в том числе и с количеством аустенита в структуре, рассчитанном по уравнению (2).

Особенно сильное влияние на количество аустенита в структуре сплавов оказывает содержание марганца.

Печенкина Лариса Степановна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: a.m.pechenkin@mail.ru



Рис. 1. Влияние химического состава сплава на степень аустенитизации структуры

На рис. 2 представлена зависимость количества аустенита от содержания марганца для сплавов со сравнительно небольшим разбросом по содержаниям углерода (2,06 – 2,3%), хрома (6 – 7%) и ванадия (6,1 – 7,1%). Видно, что эта зависимость практически линейная:

$$A = 10,3 \text{ Mn.}$$
 (3)

При содержании марганца около 5% количество аустенита в структуре сплава становится преобладающим.



Рис. 2. Зависимость количества аустенита в структуре от содержания в сплаве марганца

На количество аустенита заметное влияние оказывают также хром и ванадий, растворяющиеся в аустените. Как будет показано ниже, в аустените в значительных количествах растворяется хром и намного хуже ванадий. Поэтому в сплавах с повышенным содержанием хрома (8,5% и более) количество аустенита оказывается значительно больше, чем следует из зависимости (3); особенно резко возрастает степень аустенизации структуры при достаточно высоком содержании в сплавах марганца, хрома и ванадия (в сплаве при 5,14% Mn, 9,6% Сг и 8,3% V структура полностью аустенизирована).

Таблица 2

Результаты карбидного анализа сплавов										
Ho-	Содержание элементов, %									
мер	в сплаве						в порошке	;		карби-
спла-	С	Mn	Cr	V	С	Mn	Cr	V	Fe	дов
ва										
20	2,28	5,50	7,3	6,8	15,6	2,91	13,7	51,7	15,2	12,9
2	1,46	1,90	5,6	5,1	18,5	0,33	5,4	72,6	2,4	6,8
9	1,75	5,10	7,6	6,2	18,5	0,46	6,9	71,8	2,4	8,2
12	1,90	0,85	5,5	5,9	16,4	0,65	10,4	57,7	14,1	10,0

Как показал анализ, в структуре исследуемых сплавов содержатся карбиды двух видов: МС (типа VC) и M_7C_3 (типа Cr_7C_3). Важную информацию может дать химический состав карбидов при его использовании для определения количества в структуре сплавов каждого вида карбидов и для

оценки морфологических особенностей структуры. Химический состав карбидов определен на нескольких сплавах с использованием методов кар-

бидного и рентгеноспектрального анализов. В табл. 2 приведены химические составы сплавов и карбидных порошков, выделенных из этих сплавов с помощью карбидного анализа, а также выход карбидных порошков. Рентгеноструктурный анализ порошков показал, что в сплавах 2 и 9 содержатся только карбиды MC, а в порошках сплавов 12 и 20 карбиды MC преобладают. Приведенные в табл. 2 данные позволяют оценить средний химический состав карбидов MC и расчетным путем из нормировки состава карбиды MC и M_7C_3 и их химические составы в сплавах 12 и 20. Расчетным путем (по химическому составу сплавов и карбидных порошков) рассчитан также химический состав матрицы (аустенита при температуре закалки). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Химические составы фаз и их содержание в структуре сплавов

Hower	Фазы (или струк-	Количе-	Содержание	элементов, %	мас.		
сплава	турные составляю- щие)	ство, % мас.	С	Mn	Cr	V	Fe
1	2	3	4	5	6	7	8
	MC	6,8	18,5	0,33	5,4	72,6	2,4
	M ₇ C ₃	-	-	-	-	-	-
	матрица						
	(аустенит А)	93,2	0,22	2,01	5,6	0,18	91
2	Среднее в сплаве	100	1,46	1,90	5,6	5,1	8
9	MC	8,2	18,5	0,46	6,9	71,8	2,4
	M7C3	-	-	-	-	-	-
	А	91,8	0,25	5,5	7,7	0,34	86
	Среднее в сплаве	100	1,75	5,10	7,6	6,2	79
12	МС	7,8	18,5	0,24	5,3	72,7	2,5
	M ₇ C ₃	2,2	8,8	2,11	28,5	4,7	55,0
	А	90,0	0,29	0,87	5,0	0,14	93
	Среднее в сплаве	100	1,90	0,85	5,5	5,9	85
20	MC	9,0	18,5	0,40	6,7	72,0	1,8
	M ₇ C ₃	3,9	8,8	8,7	30,0	5,0	46,0
	А	87,1	0,27	5,9	6,4	0,12	85,0
	Среднее в сплаве	100	2,28	5,50	7,3	6,8	76

Данные карбидного анализа подтверждены результатами рентгеноспектрального анализа на установках «Стереоскан-180» и «Камека», проведенного на сплаве 20. На сканограммах участков поверхности образцов видно, что в структуре сплава содержится сравнительно мало карбидов, но много аустенита. В сплаве находятся эвтектики двух видов: двойная А + МС и тройная А + МС + М₇С₃. Использование фазового контраста на карбидах (карбид МС выглядит более темным) подтверждает, что на карбидах МС зарождаются не только колонии двойной эвтектики но и колонии тройной эвтектики. Усредненные результаты количественного рентгеноспектрального анализа, приведенные в табл. 4, почти полностью повторяют данные карбидного анализа.

Несколько повышенное содержание ванадия в аустените по сравнению с результатами карбидного анализа объясняется тем, что совместно с аустенитом сканированию подвергались и дисперсные включения карбидов МС, выделявшиеся из аустенита и при карбидном анализе переводимые в осадок.

Таблица 4

Химические составы фаз н	в сплаве 20 по данным	рентгеноспектрального	анализа
--------------------------	-----------------------	-----------------------	---------

Фазы	Содержание элементов, % мас.				
	Mn	Cr	V		
MC	0,5	7	72		
M ₇ C ₃	8,5	32	6,5		
A	6,0	7	0,6		

Таким образом, результаты фазового анализа показывают, что в исследуемых сплавах содержание хрома в матрице и в карбидах МС близко к среднему содержанию его в сплаве. Содержание ванадия в матрице очень мало и обычно при температурах около 600°С (ниже этих температур в условиях воздушной закалки диффузионное перераспределение элементов замещения в аустените практически не происходит) составляет 0,2-0,3% (в среднем 0,22%). Из соотношения между содержаниями ванадия и других металлов в карбидах МС видно, что примерно 10% содержащегося в них ванадия замещаются хромом, железом и марганцем. Поэтому количество ванадия и других металлических элементов, участвующих в образовании карбидов МС можно оценить по формуле

$$M_{\rm MC} = 1,1 \ (V - 0,2),\% \tag{4}$$

где V – среднее содержание ванадия в сплаве.

Тогда с учетом содержания углерода в карбидах МС (~ 18,5% мас.) можно рассчитать количество этих карбидов в структуре сплава (В_{мс}):

$$B_{\rm MC} = \frac{100}{100 - 18.5} M_{\rm MC} \approx 1.35V - 0.27 \tag{5}$$

Расчет количества карбидов M_7C_3 можно провести, исходя из нормировки по углероду. В аустените максимальное содержание углерода после выделения всех карбидов составляет 0,30%. Учитывая количество карбидов MC, содержание углерода в них (18,5%) и в карбидах M_7C_3 (8,8%), а также среднее содержание углерода в сплаве $C_{спл}$, имеем:

$$B_{M_{7}C_{3}} \cdot C_{M_{7}C_{3}} + B_{MC} \cdot C_{MC} + B_{A} \cdot C_{A} = 100 \cdot C_{cnn}, \quad (6)$$

где $B_{M_7 C_B}$, B_{MC} и B_A – количество каждой

фазы, мас.%;

 $C_{M_7C_5}$, C_{MC} и C_A – содержание углерода в соответствующих фазах, мас.%.

Учитывая, что $B_A = 100 - B_{M_7C_3} - B_{MC}$, а также значения содержаний углерода в фазах, имеем

$$B_{M_7C_3} = \frac{100C_{cn_7} - 18,2B_{MC}}{8,5} - 3,5 \quad (7)$$

Проведены расчеты фазового состава всех исследованных сплавов (в ряде случаев откорректированные по экспериментальным данным). Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что максимальная погрешность расчетов составляет $\pm 0,1\%$. Приведены значения критического содержания ванадия V^{*}, а также дефицит ванадия в сплавах ΔV , рассчитанный по формуле

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{V}^* - \mathbf{V}, \,\%, \tag{8}$$

где V – среднее содержание ванадия в сплаве, % мас.

Проведенный анализ результатов показал, что при значительном дефиците ванадия в структуре сплавов появляются карбиды M_7C_3 . Однако при небольшом дефиците (0,1-0,2 % V) эти карбиды практически в структуре не обнаруживаются и структура сплавов сохраняет композиционный характер. В таких сплавах могут присутствовать в очень небольшом количестве дисперсные карбиды M_7C_3 , но на характер структуры они не влияют.

При значительном дефиците ванадия (1% и более) карбиды M_7C_3 могут выделяться в структуре в виде сетки тройной квазиэвтектики или вторич-

ных карбидов. Как было показано выше, частично такую структуру можно улучшить с помощью термической обработки, однако на свойствах сплава ее влияние все же проявляется (снижением прочности и ударной вязкости).

Менее сказывается влияние дефицита ванадия в сплавах с медью, молибденом и микролегирующими элементами (сплавы M1 - M7). В этих сплавах дополнительные легирующие элементы существенно измельчают микроструктуру. Особое влияние оказывает медь. Она способствует формированию разреженной двойной эвтектики А + МС с очень равномерным рас-положением ее колоний. При этом меняется и форма карбидных включений, армирующих колонии. Значительно уменьшается разветвленность карбидных каркасов, появляются мелкие пластинки. Эти изменения в сочетании с измельчением колоний приводят к заметному повышению прочности. Микроструктура сплава приведена на рис. 3. При достаточно высоком содержании меди (1% и более) в структуре сплава могут появляться мелкие включения медистой фазы. Медистая фаза совместно с аустенитом играет роль демпфера при возникновении локальных динамических нагрузок (например, при мартенситном превращении), снижая возможность образования микротрещин, что было отмечено при анализе дефектов в отливках из исследуемых сплавов.



Рис. 3. Микроструктура сплава М4, х 600

Характерно также, что в сплавах с дополнительным легированием отрицательное влияние карбидов М₇C₃ практически не проявляется. Объясняется это их сильной измельченностью и равномерным распределением в матрице. Поэтому в таких комплексно-легированных сплавах можно допускать дефицит ванадия 2%.

Таким образом, разработанная методика определения фазового состава комплекснолегированных чугунов, основанная на использовании в качестве исходных экспериментальные данные рентгеноструктурного, рентгеноспектрального и карбидного анализов ограниченного количества сплавов, позволит определить химический состав для формирования композиционной структуры большого числа сплавов. Возможен и другой вариант оптимизации сплавов - путем их дополнительного комплексного легирования.

Литература

1. Сильман Г.И. Влияние химического состава на свойства самозакаливающихся чугунов [Текст] / Г.И. Сильман, Л. С. Печенкина, А. А. Щетинин // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. Сер. Материаловедение. – 2001. - Вып. 1.10. – С.32-34.

2. Печенкина, Л.С. Разработка износостойких самозакаливающихся сплавов для тонкостенных точнолитых деталей [Текст]: Дис. канд. техн. наук:

Воронежский государственный технический университет

05.16.01 : защищена 20.06.2000 : утв. 12.12.2000 / Л.С. Печенкина- Курск, 2000. - 193 с.

3. Печенкина, Л.С. Влияние хрома и ванадия на композиционную структуру в малоуглеродистых белых чугунах [Текст]/ Л.С. Печенкина, Г.И. Сильман, А.А. Рукавицына // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. Т.11. - № 6. – С.13-17.

4. Серпик, Л.Г. Разработка, исследование и применение износостойких белых чугунов высокой прокаливаемости [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук 05.16.01 защищена 19.06.1991 : утв. 20.12.1991 / Л.Г. Серпик. – Тула, 1991. – 238 с.

EFFECT OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE MICROSTRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF LOW-CARBON WHITE CAST IRON

L.S. Pechenkina

The results of studies of the effect of alloying elements on structure air-hardening white irons

Key words: white iron, chromium, vanadium, alloying, composite structure

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРА НА МЕЛКОКРИСТАЛЛИЧНОСТЬ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ Ni-B-H

А.В. Звягинцева

Представлены экспериментальные результаты поведения водорода в сплавах на основе никеля при его легировании атомами бора. Исследование структуры электронномикроскопическим методом показало, что легирование никелевых покрытий бором до 1% приводит к увеличению дисперсности получаемых структур и к формированию мелкокристаллической структуры. Показана взаимозависимость структуры, наводороживания, а также кинетических данных, характеризующих скорость электрокристаллизации, от содержания бора в композитах Ni-B-H

Ключевые слова: композит Ni–B–H, водород, гистограмма, микроструктура, дефекты структуры, парциальная плотность тока, размер зерна, содержание бора

Введение

В теории водородного взаимодействия водорода с металлами [1] существует понятие о наличии "водородного пробела" для переходных элементов четвёртого периода. Однако в ряде работ установлено [2, 3], что было при электрохимическом образовании металлов становится возможным существование гидридной фазы в структуре катодно-восстановленного металла. Известно, что взаимодействие металлов с водородом на катоде возможно при протекании на электроде двух параллельных процессов, а именно: восстановление металла и восстановление водорода из воды. Вероятность протекания процесса образования гидрида возможной структурой Me_mH_n с различной степенью стехиометрии обусловлено не только положением элемента в Периодической системе, но и наличием дефектов в структуре восстанавливаемого металла. В соответствии с положением элемента в Периодической системе вероятность к взаимодействию наибольшую проявляют элементы IVB и VB подгрупп. Особую склонность к взаимодействию проявляют элементы платиновой группы, а так же специфически восстанавливаемые на катоде элементы – хром и никель. Это обстоятельство позволяет утверждать, образования гидридных что вероятность соединений для такого способа формирования металла возрастает по двум причинам: 1) наличие атомарного водорода, возникающего на одной из возможных стадий суммарного электрохимического процесса; 2) наличие в структуре металла зон с высокими энергетическими потенциалами (дефекты структуры).

В общем случае процесс электрохимического взаимодействия водорода с металлом можно представить в виде элементарных реакций:

$$Me^{n} + ne \rightarrow Me^{o}$$
 (1)

$$\begin{array}{ll} H_3O^+ - H_2O \rightarrow & H^+ & (2) \\ H^+ + e \rightarrow & H^0 & (3) \end{array}$$

$$H^{o} + H^{o} \rightarrow 2H \rightarrow H_{2}$$
 (4)

(5)

$$Me_{\Delta}^{o} + H^{o} \rightarrow MeH$$

где Me^o_Δ дефект структуры металла.

Можно с достаточной степенью достоверности предположить, что стадия образования гидрида металла (5) предшествует стадии молизации водорода из свободных атомов (4).

Ранее в наших работах [2-6] было показано, что содержание водорода в покрытиях электрохимического типа на основе сплава Ni-B зависит от

ряда факторов: $V_{H_2} = f(C$ борсодержащей добавки, i_k, t_{эл-та}, $\tau_{_{3Л-3а}}$). Детальное исследование этого процесса показало, что концентрация бора в сплаве является одним из определяющих параметров, оказывающих влияние на содержание водорода в сплаве Ni-B. Было установлено, что водород может находиться как в состоянии гидрида (Ni-H), так и в свободном виде. В связи с этим представляет интерес установить соотношение между различными состояниями водорода в этом сплаве.

В общем случае количество растворённого водорода в металле может быть определено из выражения:

$$V_{\rm H_2} \equiv (m_{\rm MeT}/\rho_{\rm Me}) \times N_{\rm A} \tag{6}$$

$$\mathbf{V}_{\mathrm{H2}} \equiv \mathbf{V}_{\mathrm{Me}} \times \mathbf{N}_{\mathrm{A}} \times \mathbf{k}_{\mathrm{J}} \times \mathbf{k}_{\mathrm{d}} \times \mathbf{k}_{\mathrm{i}} , \qquad (7)$$

где N_A – постоянная Авогадро; k_{π} - коэффициент, зависящий от воздействия внешних полей на процесс образования соединений Me-H; k_d - коэффициент дефектов, учитывающий число образуемых дефектов на единицу объёма; k_i - коэффициент пересчёта объёма металла в атомную массу в соответствии с числом N_A (количеством грамм – атомов, занимающих данный объём металла).

Воспользоваться приведенными формулами для аналитического определения количества растворённого водорода относительно сложно. Однако приведенная формула (7) отражает всю феноменологию процесса взаимодействия водорода с металлом при его электрохимическом восстановлении.

Покрытия Ni-В обладают высокой твердостью, коррозионной стойкостью в агрессивных средах, паяемостью, свариваемостью и необходимой электропроводностью, устойчивы к

Звягинцева Алла Витальевна - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 89507501062

процессам окисления при высокой температуре, характеризуются низким переходным и удельным сопротивлением [6]. Расширение области применения функциональных покрытий из никеля и его сплавов зависит от возможности варьировать изменением свойств этих покрытий в зависимости от:

1. Содержания легирующего компонента, в частности, бора;

2. Параметров электролиза.

Целью данной работы являлось продолжение изучения влияния режимов электролиза (концентрации бора) на структурные изменения и содержание водорода в электрохимических композитах Ni-B-H.

Методика эксперимента

Содержание водорода определяли методом вакуумной экстракции. Образец помещают в кварцевую камеру в которой создается вакуум 10^{-5} мм. рт. ст. с азотной «ловушкой». Образец нагревается до температуры 500 ⁰С. По разности давлений до и после нагрева вычисляем объем водорода по формуле:

$$V = \frac{(P_1 - P_2)V_c \cdot K \cdot 273}{760(273 + t_k)},$$
(8)

где V – объем экстрагированного газа, см³; P₁ – конечное давление в измерительной системе, мм. рт. ст.; P₂ – начальное давление в измерительной системе, мм. рт. ст.; V_c – объем измерительной системы, см³; t_k – комнатная темпера тура, ⁰C; K – коэффициент (для водорода 0,67).

Установка позволяет получать начальный вакуум не хуже 10^{-6} мм. рт. ст., температуру экстракции можно изменять от 20 ⁰C до 800 ⁰C. Относительная погрешность в определении объема водорода не превышала 5 %. Так как медь мало адсорбирует водород [1, 7], то подложка вносит относительно небольшую погрешность в определение водорода в образце. Окончательный расчет газосодержания проводили по отношению объема выделившегося газа к весу покрытия:

$$V_{\rm H_2} = \frac{(205 \cdot \Delta P)}{m}, \ cm^3 / 100 \ r$$
(9)

где ΔP – разность давлений, мм. рт. ст.; m – масса образца, г; коэффициент 205 определен конструктивными особенностями установки.

Исследование проводили в сульфаматном электролите никелирования с использованием борсоединений класса высших полиэдрических боратов Na₂B₁₀H₁₀ [5]. Режимы электролиза: плотность тока (i_k) 0,5 – 4,0 A/дм²; температура электролита (t_{зл-та}) 30-50 0 C; pH – 3,5-4,5. Аноды – никель. Катоды – медь марки М-1. Содержание бора в композите Ni-В определяли спектрофотометрическим методом [5]. Структуру Ni–В композитов исследовали на электронном микроскопе УЭМВ – 100AK. Исследование морфологии поверхности образцов проводилось на металлографическом микроскопе МИМ-7. В качестве стандартного электролита выбран режим со следующими параметрами: плотность катодного тока равна 2 $A/дм^2$, кислотность 4,0 ед. pH, температура электролита 40 0 C и концентрация борсодержащей добавки в электролите 0,1–1 г/л. Процентное содержание бора в образце составляло 0,1; 0,5 и 1 %. Электрохимические измерения проводили потенциодинамическим методом (со скоростью развертки потенциала 4 мB/c) на потенциостате П-5827H. Катод медный с рабочей поверхностью 0,75 см². Электрод сравнения – хлорид-Серебряный, вспомогательный электрод - никелевый. Потенциалы приведены без пересчета на водородную шкалу.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты исследований микроструктуры композитов Ni-B, с построением гистограмм распределения зерен по размеру от их количества, представлены на рисунке. С увеличением концентрации борсодержащей добавки Na₂B₁₀H₁₀ в электролите, а соответственно и содержания бора в самом образце, шероховатость поверхности композита никель-бор увеличивается - она становится неоднородной и более рельефной (рисунки А и В).





В

Структура композита Ni-B при $C_B = 0,1$ %, $i_{\kappa} = 2 \text{ A/дм}^2, \text{ pH} = 4,0, t_{\text{эл-та}} = 40 \text{ }^0\text{C}$

Влияние концентрации бора на структуру композита Ni –B: А - микроструктура; В - гистограмма





В Структура композита Ni-В при $C_B = 0.5$ %, $i_{\kappa} = 2 \text{ A/дм}^2$, pH = 4,0, $t_{_{3л}\text{-ra}} = 40 \text{ }^0\text{C}$





Структура композита Ni - В при $C_{\rm B}{=}\,1\,\%$, $i_{\rm k}{=}\,2\,{\rm A/дm}^2,$ $pH{=}\,4,0,\,t_{\rm MFHa}{=}\,40\,^0{\rm C}$

Влияние концентрации бора на структуру композита Ni – B: А - микроструктура; В - гистограмма (продолжение)

Из представленных фотографий и гистограмм можно сделать вывод, что с увеличением содержания бора в композите никель-бор размер кристаллитов имеет тенденцию к уменьшению. Исследование зависимости содержания водорода от процентного соотношения бора к никелю в электролите показало, что при концентрации бора (от 0,1 до 0,4 % вес. в образце) наблюдается уменьшение содержания водорода в композите. По всей вероятности в этих условиях скорость реакции взаимодействия водорода с никелем будет минимальной. Данный факт, по-видимому, можно объяснить более совершенной структурой композита формируемой при заданных условиях электролиза. Подтверждением высказанного предположения могут служить экспериментальные результаты исследований по определению коррозионной стойкости покрытий из сплава Ni-B, проведенные в работе [6]. Для этих режимов было установлено минимальное значение тока коррозии (ікорр), определённое методом ускоренных электрохимических испытаний, что свидетельствует о более совершенной структуре таких образцов. Таким образом, степень дефектности структуры и содержание водорода в композите связаны между собой.

С увеличением концентрации бора в композите от 0,1 до 1 % максимумы по размеру кристаллитов сдвигаются влево на гистограмме в сторону меньших значений, и наблюдается формирование мелкокристаллической струк-туры. При концентрации бора в композите 0,1 % число мелких кристаллитов, диаметром от 0,01 до 0,04 мкм, составляет ~20 %, а средних, диаметром от 0,04 до 0,08 мкм, и крупных кристаллитов, с диаметром более 0,08 мкм, составляет ~80 % от общего числа кристаллитов.

При концентрации бора в композите 1 % преобладает число мелких кристаллитов. С диаметром до 0,04 мкм их содержание порядка 85 %, а сумма средних и крупных кристаллитов с диаметром более 0,04 мкм ~ 15 % от общего числа кристаллитов.

Микроструктурные исследования согласуются с поляризационными данными и содержанием бора и водорода в композите Ni-B-H. Уменьшение размера кристаллитов в композите Ni-В с увеличением борсодержащей добавки в электролите связано с особенностями адсорбционного механизма включения бора в образец. Включение легирующего компонента бора в никель увеличивает дисперсность получаемых композитов. Данная закономерность характерна лля гальванических покрытий, осаждаемых с поверхностно-активными добавками, в нашем случае борсодержащих соединений [6]. Парциальные плотности токов выделения Ni-B⁰ и H₂, характеризующие скорость электровосстановления, зависимости в от концентрации борсодержащей добавки в электролите ($t_{3л-тa} = 40$ ⁰C, pH = 4,0, d = 8 мкм) представлены в таблице.

Из таблицы следует, что при увеличении концентрации борсодержащей добавки в электролите от 0,01 до 0,10 г/л парциальная доля тока, приходящаяся на образование Ni-B⁰, уменьшается от $i_{Ni-B}^{0} = 1,96$ до $i_{Ni-B}^{0} = 1,86$ А/дм², а на выделение H₂ увеличивается от $i_{H2} = 0,04$ до $i_{H2} = 0,14$ А/дм² ($i_k = 2 \text{ А/дм}^2$; pH = 4,0; $t_{3n-Ta} = 40 \, ^{\circ}$ C). На выделение H₂ расходуется от 1,9 % (C_B = 0,01 г/л) до 7,1 % тока (C_B = 0,10 г/л) при $i_k = 2 \text{ А/дм}^2$, повышающим возможность включения водорода в композит. Выделяющийся водород адсорбируется на поверхности растущего кристаллита при электрокристаллизации металла, а затем включается в композит, вызывая его дополнительное наводороживание. Степень наводороживания образцов Ni-B увеличивается от 68 до 113 см³/100 г с ростом содержания бора от 0,1 до 1 % ($i_k = 2 \text{ А/дм}^2$; рH = 4,0; $t_{3n-Ta} = 40 \, ^{\circ}$ C).

Парциальные плотности токов выделения Ni - B⁰ и Н₂ в зависимости от концентрации

борсодержащей добавки в электролите. Режимы электролиза: $i_k = 2 \text{ A/дм}^2$; $t_{\text{эл-та}} = 40 \ ^0\text{C}$; pH = 4,0; d = 4 мкм

Концен- трация Na ₂ B ₁₀ H ₁₀ в электро- лите, г/л	Со- дер- жа- ние бо- ра в ком- по- зите Ni- В, %	Парциа. плотн токов, 4 і ⁰ і _{Ni-B}	льные ости А/дм ² і _{H2}	BT _{H2} , %	V _{H2} см ³ /10 0 г
0	0	1,86	0,14	6,9	104
0,01	0,35	1,96	0,04	1,9	68
0,05	0,62	1,91	0,09	4,4	80
0,10	0,97	1,86	0,14	7,1	113

По данным таблицы доля тока, приходящаяся на образование Ni-B⁰, с повышением концентрации анионов борсодержащей добавки $B_{10}H_{10}^{2^{-}}$ в электролите, уменьшается, а на выделение H_2 увеличивается. При этом содержание бора в композите Ni-B возрастает, согласно данным химического анализа состава покрытий. Это можно объяснить повышением концентрации адсорбированных анионов $B_{10}H_{10}^{2^{-}}$ на поверхности катода, вследствие увеличения соотношения концентрации анионов $B_{10}H_{10}^{2^{-}}$ катионам Ni²⁺ в приэлектродном слое. По данным поляризационных исследований происходит увеличение доли тока на выделение H_2 , и уменьшение на образование Ni-B⁰ с увеличением концентрации бора. Полученные данные свидетельствуют о снижении скорости электровос-

становления катионов Ni²⁺ и увеличении концентрации включаемого бора в получаемый композит. Формирование композита на поверхности медной основы начинается с образования на ней кристаллических зародышей осаждаемого металла.

В гальванотехнике электроосаждение металлов обычно происходит при высоких перенапряжениях и образующиеся зародыши представляют собой кластеры из нескольких атомов, не подчиняющиеся законам макроскопических тел. С ростом перенапряжения катода увеличивается скорость образования зародышей на подложке и уменьшается их размер, способствует получению что мелкокристаллических композитов. В этом случае граница раздела, представляющая собой систему твёрдая фаза электрода - адсорбированной анион борсодержащей добавки B₁₀H₁₀²⁻, является местом с повышенным потенциалом энергии, которая может служить центром зародышеобразования. Число наиболее вероятных мест образования зародыша носит статистический характер и тем самым определяет неравномерность распределения кристаллитов одного порядка по поверхности электрода. На базе химических соединений – фаз внедрения могут образовываться твердые растворы с дефектной решеткой или твердые растворы вычитания [7, 8]. В результате происходит уменьшение размера образующихся кристаллитов и увеличение их концентрации на поверхности образца, приводя к выравниванию его микропрофиля. Это свидетельствует о возможности формирования структур с наибольшим числом дефектов в единице объема металла. С другой стороны, введение бора способствует формированию неявно выраженной кристаллической структуры с переходом к аморфным структурам. Металлы, имеющие аморфное состояние, как известно, аккумулируют ~ на 40 % водорода больше, чем кристаллические структуры [7].

При электрокристаллизации никеля в различные присутствии бора формируются структурные дефекты, которые изменяют кинетику абсорбции водорода и его содержание в единице объема. Возможности электрохимических композитов Ni-B-H по обратимой сорбции водорода рассматривались с учетом полей напряжения, создаваемых структурными дефектами. Основными типами структурных дефектов являются краевые дислокации, вершины микротрещин и клиновые дисклинации. Атомы водорода взаимодействуют с полями напряжений перечисленных дефектов. Содержание водорода в единице объема металла увеличивается. При описании диффузионных процессов при наличии примесных атомов выбрана модельная система - цилиндрические оболочки (полые цилиндры) и рассмотрена диффузия атомов водорода через цилиндрическую оболочку с примесными и структурными ловушками в работе [8]. Для описания кинетики сегрегации водорода около структурного дефекта, если определяющий вклад в кинетику процесса дает градиент поля напряжений, соответствующие зависимости, будут иметь следующий вид:

$$N_1(\tau) = B_1 \tau^{2/3}$$
 (краевая дислокация)

 $N_2(\tau) = B_2 \tau^{4/5}$ (вершина микротрещины) $N_3(\tau) = B_3 \tau$ (клиновая дисклинация)

где
$$\tau = \frac{Dt}{r_0^2}$$
 - безразмерное время, B₁, B₂ и B₃ -

постоянные, зависящие от свойств материала, r₀ - характерный размер области для исключения сингулярностей в потенциалах взаимодействия, N(т) - зависимость числа захваченных атомов водорода от времени.

Клиновая дисклинация осуществляет захват атомов водорода по линейному закону. Кинетика водородных сегрегаций для вершины микротрещины и краевой дислокации протекает более медленно.

Выводы

Результаты микроструктурных исследований позволяют сделать вывод, что размер кристаллитов и характер структуры определяются условиями электроосаждения композитов, в данной работе концентрацией бора в композите. Математической зависимости размера кристаллитов от концентрации бора в композите на данном этапе исследований выявить не удалось, тем не менее, можно сделать следующий основной вывод по этому поводу: с увеличением концентрации бора в композите от 0,1 до 1 % наблюдается формирование мелкокристаллической структуры. Повышение концентрации бора в композите Ni-B-H вызывает увеличение содержания водорода, по сравнению с никелем. Варьируя концентрацию бора в никелевой матрице можно формировать структуры с оптимальным числом дефектов в единице объема металла, которые могут являться потенциальными ловушками для атомов водорода. Это предопределяет их дальнейшее применение в качестве накопителей водорода для хранения в металлогидридной форме. В заключение можно отметить, что для аккумулирования водорода в структуру электрохимической системы необходимо формировать структуры с оптимальным числом дефектов в единице объема металла.

Литература

1. Маккей К. Водородные соединения металлов [Текст] / К. Маккей. - М.: Изд-во «Мир», 1968. - 244 с.

2. Zvyagintseva A.V. On the Stability of Defects in the Structure of Electrochemical Coatings [Tekcr] /A.V. Zvyagintseva, Yu.N. Shalimov //Surface Engineering and Applied Electrochemistry. - 2014. - Vol. 50. - No. 6. - PP. 466–477.

3. Звягинцева А.В. Влияние бора на наводороживание никелевых плёнок [Текст]/А.В. Звягинцева // Альтернативная энергетика и экология. - 2006. - № 5. - С. 85-87.

4. Звягинцева А.В. Структурные ловушки в электрохимических никелевых системах для водородных атомов [Текст] /А.В. Звягинцева //Наноразмерные системы: строе-ние, свойства, технологии (НАНСИС-2013): Тезисы IV Междунар. науч. конф. (Киев, 19–22 нояб. 2013 г.); редкол.: А.Г. Наумовец [и др.]. - Киев, 2013.-VIII с. - 578 с.: ил. - С. 27.

5. Звягинцева А.В. Исследование влияния бора на формирование электрохимических структур на основе никеля [Текст] /А.В. Звягинцева //Международный журнал экспериментального образования. – 2012. - №9. – С. 27.

6. Звягинцева А.В. Взаимосвязь структуры и свойств гальванических никелевых покрытий, легированных бором, в изделиях электронной техники [Текст] / А.В. Звягинцева // Гальванотехника и обработка поверхности. - 2007. - Т.XV. - №1. - С. 16-22.

7. Поветкин В.В. Структура электролитических покрытий [Текст] / В.В. Поветкин, И.М. Ковенский. - М.: Металлургия, 1989. - 136 с.

8. Власов Н.М. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов [Текст]: монография /Н.М. Власов, А.В. Звягинцева. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГТУ», 2012. - 248 с.

Воронежский государственный технический университет

THE EFFECT OF BORON CONCENTRATION ON FINELY-CRISTALLINITY OF ELECTROCHEMICAL Ni-B-H COMPOSITES

A.V. Zvyagintseva

The experimental results of the behavior of hydrogen in alloys of Nickel in its alloying by boron atoms are presented. Investigation of the structure of electron microscopic method showed that the doping of the Nickel coatings with boron up to 1% leads to an increase in the dispersity of the resulting structures and to the formation of finely-crystalline structure. The interdependence of the structure, hydrogenation and kinetic data that characterize electrocrystallization, depending on the boron content in the composite Ni-B-H, is shown

Key words: composite Ni-B-H, hydrogen, histogram, microstructure, structural defects, partial current density, grain size, the content of boron

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛООКСИДНЫХ ПЛЕНОК SnO₂, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ

С.А. Белоусов, А.А. Носов, Т.Г. Меньшикова, С.И. Рембеза

В статье рассмотрена методика изготовления тонких металлооксидных пленок SnO₂ по золь-гель технологии. Обоснован выбор оптимального времени созревания раствора для получения пленок с наилучшими характеристиками. Исследованы параметры пленок SnO₂ для оценки возможности использования их в качестве элементов конструкции прозрачного тонкопленочного полевого транзистора

Ключевые слова: металлооксиды, золь-гель технология, тонкие пленки, прозрачность, электрические свойства

В настоящее время металлооксидные полупроводники вызывают огромный научный интерес в связи с их широким практическим применением: газовые датчики [1, 2], солнечные элементы [3], изделия прозрачной электроники [4, 5] и т. д. Одним из таких полупроводников является диоксид олова.

Диоксид олова – прямозонный полупроводник п-типа с шириной запрещенной зоны E_g = 3,6 эВ [6]. Тонкие пленки диоксида олова прозрачны в видимой и ближней ультрафиолетовой областях и при этом могут обладать высокой электропроводностью. Такое сочетание оптических и электрофизических свойств определяет широкое применение этого материала на практике. Известно. функциональные свойства что оксилов различной обеспечиваются степенью которая нестехиометричности по кислороду, зависит от технологии изготовления оксида и его последующей обработки [7].

Среди основных методов синтеза пленок диоксида олова можно назвать: высокочастотное магнетронное распыление [8], импульсное лазерное напыление [9], электронно-лучевое испарение [10], а также, интересующий нас, золь-гель метод [11, 12]. Этот метод позволяет достичь снижения энергозатрат и высокой степени чистоты продуктов на всех стадиях синтеза при минимуме стоимости процесса. Однако, процессы, происходящие при созревании раствора, и дальнейшее изготовление пленок методом золь-гель технологии мало изучены, что определяет актуальность настоящей работы.

Цель работы заключается в определении оптимального времени созревания золь-гель раствора, а также в исследовании параметров изготовленных пленок SnO₂ для оценки возможности использования их в качестве элементов конструкции прозрачного тонкопленочного полевого транзистора.

Основное преимущество золь-гель метода заключается в высокой степени гомогенизации исходных компонентов [13]. Это достигается благодаря растворению солей и оксидов исходных веществ в соответствующем растворе.

В данной работе для приготовления золя было взято 5 грамм порошка хлорида олова (SnCl₂·2H₂O). В качестве растворителя использовался изопропиловый спирт (C₃H₈O) – 25 мл [14]. Перемешивание осуществлялось на магнитной мешалке с подогревом (IKA RH basic 2) при температуре 100 °C в течение 20 минут. Схема изготовления пленок SnO₂ представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема изготовления пленок SnO₂

В течение первых 5 минут скорость перемешивания составляла 2000 об/мин. Затем после закипания раствора скорость перемешивания была снижена до 200 об/мин и емкость с раствором была накрыта стеклянной крышкой. В итоге, по истечению 20 минут раствор выпарился примерно на 15 % от начального объема. Цвет раствора – прозрачный. Далее полученный золь был оставлен на созревание при комнатной температуре.

Для определения оптимального времени созревания раствора была изучена динамика изменения вязкости со временем старения. Измерения проводили при температуре 24 °С. Для определения вязкости жидкости изготовленного

Белоусов Сергей Алексеевич – ВГТУ, аспирант, е-mail: heroy777@mail.ru

Носов Андрей Андреевич – ВГТУ, магистрант, e-mail: sir.baters@yandex.ru

Меньшикова Татьяна Геннадьевна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: menshikova.vrn@mail.ru

Рембеза Станислав Иванович – ВГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор, e-mail: rembeza@yandex.ru

золя использовался капиллярный (вискозиметрический) метод определения вязкости [15].

Для измерения вязкости использовался капилляр диаметром 2 мм. Коэффициент вязкости определялся по времени истечения контролируемого объема жидкости по сравнению с водой, чья вязкость при 24 °C составляет $\eta_0 = 0,914 {\cdot} 10^{-3}$ Па•с. Вязкость при этом рассчитывалась по формуле:

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho t}{\rho_0 t_0} \tag{1}$$

где η_0 коэффициент вязкости воды, t_0 – время истечения воды (c), t – время истечения жидкости (c), ρ – плотность исследуемой жидкости, ρ_0 – плотность воды.

На основе результатов измерений проведен расчет динамической вязкости золей по методике, принятой при исследовании коллоидных систем. На рис. 2 представлен график зависимости вязкости золь-гель системы от времени.



Рис. 2. Кривая зависимости динамической вязкости раствора от времени

Анализ, представленного на рис. 2 графика, показывает, что образование геля начинается через 10 часов после приготовления раствора. К этому же времени раствор полностью становится непрозрачным и приобретает молочный цвет.

В качестве подложек были использованы предметные стекла размером 3,5 × 2,5 см² для микропрепаратов (ГОСТ 9284-75). Подложки были предварительно отмыты в этиловом спирте и протерты насухо. Метод нанесения пленок для всех образцов был одинаков – центрифугирование. На вращающуюся подложку (2000 об/мин) из шприца наносился 1 мл изготовленного раствора-геля. Образцы после нанесения слоя геля были высушены при комнатной температуре. Далее температура сушки была увеличена до 150 °С и в таком режиме образцы были просушены ещё 5 минут. Таким образом, было изготовлено 3 образца золь-гель пленок SnO₂: образец №1 по истечению 8-ми часов после изготовления, то есть когда раствор ещё полностью был золем, образец №2 после 10 часов, когда раствор уже начал густеть и образец №3 после 12 часов, когда раствор уже представлял собой вязкий гель молочного цвета. Далее был осуществлен изотермический отжиг образцов при температуре 300 °C в течение 1 часа.

После отжига было проведено исследование оптических и электрофизических свойств данных пленок.

Первым шагом было определение толщин пленок SnO₂. Для этого использовался микроинтерферометр МИИ-4, принцип действия которого основан на явлении интерференции света. Для возникновения интерференции необходимо, чтобы падающее излучение отражалось не только от поверхности нанесенного слоя, но и от его границы с подложкой. Это означает, что слой должен быть прозрачным в используемом интервале длин волн. При определении толщины на пленке делается царапина. При измерении глубины царапины или риски следует определить, на какую долю интервала между интерференционными полосами или на сколько интервалов изгибается полоса в месте прохождения царапины за счет интерференции света.

Для образцов №1 и №2 толщина составила 1 мкм, а для образца №3 – 1,5 мкм. Хотя режимы нанесения всех пленок были одинаковы, толщина третьего образца получилась больше, чем у остальных образцов. Это можно объяснить тем, что третий образец наносился уже из более густого раствора, чем первые два.

Измерения спектров пропускания проводили двухлучевом спектрофотометре общего на назначения СПЕКС ССП-715-М. При работе прибора свет от источника фокусируется на входной щели монохроматора. Коллимирующее зеркало направляет световой поток на дифракционную решетку. которая ИЗ немонохроматического излучения выделяет спектральные составляющие в зависимости от длины волны. Через выходную щель монохроматора луч проходит через фильтр подавления излучения второго порядка, разделяется на два луча, которые проходят соответственно через эталонную кювету и кювету с исследуемым образцом. Детектор точечного типа представляет собой кремниевый фотодиод, преобразующий световой поток в электрический сигнал, который затем обрабатывается и выводится на дисплей.

Спектры пропускания представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что прозрачность образца №3, изготовленного из геля, более высокая, чем у образцов №1 и №2, изготовленных до гелеобразования. Прозрачность образца №3 в видимом диапазоне составила 75 %.

Зная толщину образца, по известной методике [16] из спектров пропускания был вычислен коэффициент поглощения α по следующей формуле:

$$\alpha = -\frac{1}{d} \cdot \ln T, \qquad (2)$$

где Т – коэффициент пропускания, d – толщина пленки SnO₂.

Как уже говорилось ранее SnO₂, является прямозонным полупроводником, а для прямых переходов спектральная зависимость коэффициента поглощения $\alpha = f(hv)$ представляется в координатах $(\alpha hv)^2 = f(hv)$. Таким образом, $(\alpha hv)^2$ линейно зависит от энергии световых квантов в некотором интервале. Продолжение этой прямой до пересечения с осью абсцисс позволяет определить ширину запрещенной зоны E_g для прямых разрешенных переходов. Зависимости $(\alpha hv)^2$ от энергии света для образцов SnO₂ №1, №2 и №3 представлены на рис. 4.







Рис. 4. Зависимости (αhv)² от энергии света для образцов SnO₂ №1, №2 и №3

По зависимостям (αhv)² от энергии световых квантов, представленным на рис. 4, была определена ширина запрещённой зоны диоксида олова. Для образца №1 $\rm E_g \approx 3$
эВ, для образца №2 $\rm E_g \approx 3,3$
эВ и для №3 Е_g ≈ 3,7 эВ. Значение ширины запрещенной зоны для образца №3 ближе всего к истинному значению ширины запрещенной зоны SnO2 при комнатной температуре (Eg = 3,6 эВ). Ширина запрещенной зоны образцов №1 и №2 меньше истинного значения, так как пленка SnO₂, синтезированная золь-гель методом на различных созревания стадиях раствора обладает нестехиометричностью по кислороду.

были Также проведены измерения сопротивления, подвижности и концентрации свободных носителей заряда. Электросопротивление тонких пленок измерялось по методу Ван-дер-Пау [17]. Концентрация и подвижность свободных носителей заряда определялись из измерений эффекта Холла также по методу Ван-дер-Пау в магнитном поле 0.63 Тл. Регистрация величин происходит с помощью цифровых мультиметров MASTECH MY64 с пределами измерений от 1 мВ 1000 B. Ток, текущий через образец, до падение напряжения определяется через на эталонном сопротивлении, включенном последовательно цепь. Для определения в подвижности и концентрации носителей заряда необходимо снять серию замеров: ток, протекающий через образец, напряжение при заданных значениях индукции магнитного поля. Все измерения проводятся при двух направлениях магнитного поля и двух направлениях тока.

Результаты измерений электросопротивления, подвижности и концентрации свободных носителей зарядов представлены в таблице.

Результаты измерения сопротивления, подвижности и концентрации свободных носителей зарядов

№ образца	Rs, кОм/□	ρ, Ом∙см	μ, см ² /В·с	n, см ⁻³
1	223,19	22,32	37,9	$7,39.10^{15}$
2	294,32	29,43	61,69	$3,44 \cdot 10^{15}$
3	947,93	142,19	54,07	$8,13 \cdot 10^{14}$

Из таблицы видно, что более низким сопротивлением обладают образцы №1 и №2, которые были синтезированы перед гелеобразованием. Образец №3, изготовленный из геля и обладающий самой высокой прозрачностью, наоборот, имеет большое сопротивление.

Добавка SbCl₃ к исходному раствору позволит синтезировать низкоомные прозрачные пленки (SnO₂ + Sb₂O₃), которые могут заменить содержащие дорогостоящий индий пленки ITO, широко используемые в настоящее время для истока, стока и затвора прозрачного транзистора [18]. В этом направлении будет продолжена дальнейшая работа.

В результате выполненных исследований разработана методика золь-гель синтеза прозрачных

тонких пленок диоксида олова с параметрами, пригодными для изготовления элементов конструкции прозрачного полевого транзистора.

Из измерений вязкости жидкости определено время созревания геля из раствора соли хлорида олова в изопропиловом спирте. Установлено, что 12 часов является оптимальным временем созревания раствора для изготовления пленок, обладающих высокой прозрачностью, а 8 – для изготовления пленок, обладающих низким сопротивлением.

Исследованы электрические и оптические свойства тонких пленок SnO₂, изготовленных методом центрифугирования из растворов, взятых на разных стадиях созревания геля. Установлено, что по электрическим и оптическим параметрам наилучшими свойствами обладают пленки, изготовленные из раствора хлорида олова через 12 часов после изготовления раствора.

Исходя из этого, можно сказать, что для применения золь-гель пленок SnO₂ в прозрачной электронике больше подходит технология, по которой был изготовлен образец №3, хотя он и обладает достаточно высоким сопротивлением.

Работа выполнена при финансовой поддержке научно-исследовательской работы №3.574.2014/К в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Schmid, W. Sensing of hydrocarbons with tin oxide sensors: possible reaction path as revealed by consumption measurements [Text] / W. Schmid, N. Barsan, U. Weimar // Sensors and Actuators B. - 2003. - Vol. 89. - №3. - P. 232-236.

2. Gracheva, I.E. AFM techniques for nanostructures materials used in optoelectronic and gas sensors [Text] / I.E. Gracheva, Y.M. Spivak, V.A. Moshnikov // IEEE EUROCON 2009, St. Petersburg. - 2009. - P. 1246-1249.

3. Fukuda, A. Heterostructure solar cells based on solgel deposited SnO_2 and electrochemically deposited Cu_2O [Text] / A. Fukuda, M. Ichimura // Materials Sciences and Applications. - 2013. - Vol. 4. - Ne6A. - P. 1-4.

4. Room temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors [Text] / K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, H. Hosono // Nature. - 2004. - Vol. 432. - P. 488–492.

5. Indium tin oxide thin films for organic light-emitting devices [Text] / H. Kim, A. Pique, J. S. Horwitz, H. Mattoussi, H. Murata, Z. H. Kafafi, D. B. Chrisey // Applied physics letters. - 1999. - Vol. 74. - №23. - P. 3444-3446.

6. Batzill, M. The surface and materials science of tin oxide [Text] / M. Batzill, U. Diebold // Progress in Surface Science. - 2005. - Vol. 79. - P. 47–154.

7. Rantala, T.T. Electronic structure of SnO_2 (110) surface [Text] / T.T. Rantala, T.S. Rantala, V. Lantto // Materials Science in Semiconductor Processing. - 2000. - Vol. 3(1-2). - P. 103-107.

8. Stjerna, B. Optical and electrical properties of SnO_x thin films made by reactive R.F. magnetron sputtering [Text] / B. Stjerna, C. G. Granqvist // Thin Solid Films. - 1990. - Vol. 193/194. - P. 704-711.

9. Synthesizing SnO_2 thin films and characterizing sensing performances [Text] / T. Ohgakia, R. Matsuoka, K. Watanabe, K. Matsumoto, Y. Adachi, I. Sakaguchi, S. Hishita, N. Ohashi, H. Haneda // Sensors and Actuators B. - 2010. - Vol. 150. - P. 99-104.

10. Якушова, Н.Д. Методы синтеза пленок модифицированного диоксида олова и их сенсорные свойства [Текст] / Н.Д. Якушова // Молодой ученый. - 2013. - №2. - С. 9-14.

11. Пронин, И.А. Управляемый синтез газочувствительных пленок диоксида олова, полученных методом золь-гель-технологии [Текст] / И.А. Пронин // Молодой ученый. - 2012. - №5. - С. 57-60.

12. Особенности синтеза и исследования нанокомпозитных пленок, полученных методом зольгель-технологии [Текст] / И.А. Аверин, А.А. Карманов, В.А. Мошников, Р.М. Печерская, И.А. Пронин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физикоматематические науки. - 2012. - №2 (22). - С. 155-162.

13. Максимов, А.И. Основы золь-гель технологии нанокомпозитов [Текст] / А.И. Максимов, В.А. Мошников, Ю.М. Таиров, О.А. Шилова – СПб., ООО «Техномедиа» Изд-во «Элмор», 2007. - 255 с.

14. Wei, L. Electronic structure of the doped SnO_2 [Text] / L. Wei, C. Lili // Science In China (Series B). – 2001. - Vol. 44 - No1. - P. 63-67.

15. Фарус, О.А. Исследование влияния типа катализатора на процессы гелеобразования золь-гель систем на основе тетраэтоксисилана [Текст] / О.А. Фарус // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. - Том 7. - №4. - С. 1-10.

16. Физические методы исследования материалов твердотельной электроники [Текст] / С.И. Рембеза, Б.М. Синельников, Е.С. Рембеза, Н.И. Каргин – Ставрополь: СевКавГТУ, 2002. - 432 с.

17. Никольский, А.Б. Физические методы исследования неорганических веществ [Текст] / А.Б. Никольский; под ред. А.Б. Никольского. – М., Академия, 2006. - 443 с.

18. Talaat, M. H. Structural, electrical and optical properties of ATO thin films fabricated by dip coating method [Text] / M. H. Talaat, K. H. Naser // Int. Nano Lett. - 2011. - Vol. 1. - N2. - P. 123-128.

Воронежский государственный технический университет

ELECTRICAL PROPERTIES METAL OXIDE FILMS OF SnO₂, PREPARED WITH SOL-GEL TECHNOLOGY

S.A. Belousov, A.A. Nosov, T.G. Menshikova, S.I. Rembeza

The article describes the method of making thin metal-oxide films SnO_2 with sol-gel technology. The choice of the optimal time of maturation of the solution to produce films with the best characteristics argumented. The parameters SnO_2 films investigated to assess the feasibility of their use as structural elements of a transparent thin film field effect transistor

Key words: metaloxides, sol-gel process, thin films, transparency, electrical properties

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 517.977.56

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ

С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов

Представлено исследование задачи оптимизации с точки зрения анализа состояний исходной и сопряженной систем. Получены необходимые и достаточные условия существования и единственности оптимума такой задачи. Результаты иллюстрированы примерами, часто встречающимися на практике

Ключевые слова: оптимизация управления, сопряженные системы, необходимые и достаточные условия существования оптимума

Введение. В работе рассматриваются вопросы оптимизации функциональнодифференциальных систем с распределенными параметрами на сети (графе) с точки зрения операторных соотношений и им соответствующих сопряженных состояний. Представлены новые подходы анализа задач оптимизации с пространственной переменной, изменяющейся на пространственной сети, математические модели которых и соответствующие им начально-краевые задачи для дифференциальных систем используют в качестве множеств изменения пространственной переменной ограниченные геометрические графы [1]. Применение указанного подхода возможно и в более общем случае при анализе оптимизационных залач на сетеподобных областях эвклидова пространства \mathbb{R}^n . Работа продолжает исследования, представленные в [2-7].

1. Оптимизация эллиптических систем. Данный раздел имеет вспомогательный характер и определяет основную идею дальнейшего исследования [8]. Пусть H – гильбертово пространство над полем действительных чисел R. Рассмотрим в H неограниченный оператор L с областью определения D(L), плотной в H (предполагается, что L – замкнутый оператор). Снабдив D(L) нормой

$$||u|| = (|u|^2 + |Lu|^2)^{1/2}$$

(через |u| обозначена норма в H), будем предполагать, что L является изоморфизмом D(L)и H, причем $(Lu,u) \ge 0$ для любых $u \in D(L)$ (через (\cdot, \cdot) обозначено скалярное произведение в H). Пусть далее U – гильбертово пространство функций, осуществляющих управляющие воздействия на процесс, описываемый оператором L. Рассмотрим линейный оператор $B: U \to H$ (*оператор воздействия*). Для заданной функции воздействия $v \in U$ состояние y(v) системы будет принадлежащее D(L) решение уравнения

$$Ly(v) = f + Bv, \qquad (1)$$

f задано в H. Для $v \in U$ задается функционал (в приложениях – функция стоимости, штрафная функция) вида

$$J(v) = |y(v)|^2 + ||u||_U^2$$

(приведенный функционал носит иллюстративный характер и ни в коей мере не описывает все ситуации, встречающиеся на практике). Можно показать [1], что существует и притом только один элемент $u \in U$ такой, что для любых $v \in U$

$$J(u) \le J(v) \tag{2}$$

Определение 1. Элемент $u \in U$ называется оптимальной функцией воздействия (*оптимум*) задачи (1), если она удовлетворяет неравенству (2).

В монографии Ж.-Л. Лионса [1] показано, что $u \in U$ характеризуется тем, что для любых $v \in U$

$$(y(u), y(v) - y(0)) + (u, v)_{U} = 0.$$
 (3)

Введем *сопряженное состояние* p(v) системы (1), $p(v) \in D(L^*)$:

$$L^* p(v) = y(v) \, ,$$

то соотношение (3) для любых $v \in U$ будет эквивалентно уравнению

$$(L^* p(u), y(v) - y(0)) + (u, v)_{U} = 0$$

откуда

$$p(u), L(y(v) - y(0))) + (u, v)_{U} = 0$$

и далее для любых $v \in U$

$$\left(p(u), Bv\right) + \left(u, v\right)_{U} = 0,$$

$$B^* p(u) + u = 0$$
. (4)

Исключая *и* из (4), получаем следующее утверждение:

Подвальный Семен Леонидович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: <u>spodvalny@yandex.ru</u>

Провоторов Вячеслав Васильевич – ВГУ, д-р физ.-мат. наук, доцент, e-mail: <u>wwprov@mail.ru</u>

Теорема 1. Оптимум системы (1) имеет вид $u = -B^* p(u)$,

где р задается решением $\{y, p\} \in D(L) \times D(L^*)$ системы

$$Ly + BB^* p = f,$$

$$L^* p - y = 0.$$
(5)

2. Оптимизация эволюционных систем. Ниже приводится математическое описание процессов [8], для которых зависимость от времени вносит существенный вклад в анализ (см. также [9, 10]).

2.1. Основные обозначения и понятия. Пусть V - заданное подпространство пространства H. Обозначим через V^* пространство, сопряженное к V, будем считать, что H^* совпадает с H, тогда $V \subset H \subset V^*$. Через $t \in (0,T)$, $T < \infty$ обозначим временную переменную.

Пусть задана билинейная форма $\varphi, \psi \to \ell(t; \varphi, \psi)$, непрерывная на пространстве *V* со следующими свойствами:

1) для любых $\phi, \psi \in V$ функция $t \to \ell(t; \phi, \psi)$ измерима на (0, T)

2) для любых $\varphi, \psi \in V$ имеет место

$$\begin{aligned} \left| \ell(t; \varphi, \psi) \right| &\leq c \left\| \varphi \right\|_{V} \left\| \psi \right\|_{V} \\ \forall t \in (0, T), \ 0 < c < \infty; \end{aligned}$$

$$\tag{6}$$

3) существует такое число λ , что

$$\begin{aligned} \left| \ell(t; \varphi, \varphi) \right| + \lambda \left\| \varphi \right\|_{H}^{2} &\geq \alpha \left\| \varphi \right\|_{V}^{2} \\ \forall \varphi \in V, \ 0 < \alpha < \infty, \end{aligned}$$

$$(7)$$

Введем далее пространство $L_2(0,T;V)$ функций $t \to f(t)$, отображающих интервал (0,T) в пространство V, измеримых и таких, что выполняется $(\int_0^T ||f(t)||_V^2 dt)^{1/2} < \infty$.

Аналогично определяется пространство $L_2(0,T;V^*)$.

Для функции $f \in L_2(0,T;V)$ можно определить следующим производную образом. Ввелем пространство, сопряженное к пространству отображений на интервале (0, T) со значениями в V. Пусть D((0,T)) – пространство отображений на интервале (0,T) со значениями в V, бесконечно дифференцируемых на (0,T)И имеющих компактные R (0,T)носители. Через $D^{*}((0,T);V)$ обозначим пространство линейных непрерывных отображений элементов пространства D((0,T)) со значениями в V. Таким образом, если $f \in D^*((0,T);V)$, то $f(\varphi) \in V$ и $\varphi \to f(\varphi)$ непрерывное отображение $D((0,T)) \rightarrow V$ для любого элемента $\varphi \in D((0,T))$. Будем обозначать $f(\phi)$ как обычные функции:

$$f(\varphi) = \int_{0}^{T} f(t)\varphi(t)dt .$$
(8)

Определим производную $\frac{df}{dt}$ элемента

 $f \in D^*((0,T);V)$ с помощью соотношения

$$\varphi \to \frac{df}{dt}(\varphi) = -f(\frac{d\varphi}{dt}).$$

Откуда следует, что задано линейное непрерывное отображение $D((0,T)) \rightarrow V$, а значит, $\frac{df}{dt}$ суть элемент $D^*((0,T);V)$.

Предельный переход $f_n \to f$ при $n \to \infty$ в пространстве $D^*((0,T);V)$ означает $f_n(\varphi) \to f(\varphi)$ при $n \to \infty$ для любых $\varphi \in D((0,T))$; в этом случае $\frac{df_n}{dt} \to \frac{df}{dt}$ в $D^*((0,T);V)$.

Замечание 1. Если $f \in L_2(0,T;V)$, то можно определить $f(\phi)$ равенством (8), т.е. обычным интегралом Лебега со значениями в V. Тем самым определяется также элемент $\tilde{f} \in D^*((0,T);V)$ и линейное непрерывное взаимно однозначное отображение $f \to \tilde{f}$, т.е. вложение пространства $L_2(0,T;V)$ в $D^*((0,T);V)$. Отождествляя элементы f и \tilde{f} , получим $L_2(0,T;V) \subset D^*((0,T);V)$. Следовательно, для функции $f \in L_2(0,T;V)$ всегда можно определить производную $\frac{df}{dt} \in D^*((0,T);V)$.

2.2. Основные утверждения. В соответствии с замечанием 1 введем пространство $W(0,T) = \left\{ f : f \in L_2(0,T;V), \frac{df}{dt} \in D^*((0,T);V) \right\},$

снабженное нормой, определяемой соотношением

$$\|f\|_{W(0,T)} = \left(\int_{0}^{T} \|f(t)\|_{V}^{2} dt + \int_{0}^{T} \left\|\frac{df}{dt}\right\|_{V^{*}}^{2} dt\right)^{1/2}$$

Замечание 2. Для каждого фиксированного *t* можно записать

$$\ell(t;\varphi,\psi) = (A(t)\varphi,\psi), \quad A(t)\varphi \in V^*,$$

где символ (,,) обозначает скалярное произведение V^* элементов, принадлежащих и *V* , соответственно. Отметим, что $A(t): L_2(0,T;V) \to L_2(0,T;V^*)$ линейный ограниченный оператор. Действительно, если $f \in L_2(0,T;V) ,$ то $A(t)f \in V^*$. Функция $t \to (A(t)f)(t)$ измерима в силу свойства 1 и в силу (6) удовлетворяет условию

$$||A(t)f(t)||_{V^*} \leq c ||f(t)||_V$$

откуда и следует утверждение.

Пространство W(0,T) обладает следующим важным свойством:

Теорема 2 [1]. Всякая функция $f \in W(0,T)$, надлежащим образом измененная на множестве меры нуль, является непрерывной функцией $[0,T] \rightarrow H$.

Рассмотрим теперь эволюционную задачу: определить функцию $y(t) \in W(0,T)$, удовлетворяющую уравнению

$$\frac{dy}{dt} + A(t)y = f , \qquad (9)$$

где f(t) – заданная функция пространства $L_2(0,T;V^*)$, и начальному условию

$$y(0) = y_0,$$
 (10)

где y₀ – заданный элемент пространства H.

Теорема 3. Если выполнены условия (6), (7), то задача (9), (10) имеет единственное решение, непрерывно зависящее от исходных данных: билинейное отображение $f, y_0 \rightarrow y$ пространства $L_2(0,T;V^*) \times H$ в W(0,T) непрерывно.

Доказательство теоремы здесь не приводится, оно основано на методе Галеркина и почти дословно доказательства повторяет аналогичных утверждений, представленных в работах [10, 11]. При этом существенно используется предположение сепарабельности пространства V наличие _ бесконечного специального базиса, который в прикладных задачах (оператор А не зависит от переменной t: A = A(t)) является системой собственных функций (или обобшенных слбственных функций) оператора А в пространстве V [10].

Замечание 3. Во многих ситуациях, прежде всего связанных с дифференцируемостью элементов пространства V и однородностью краевых условий для этих элементов, удобно использовать эквивалентную вариационную форму записи задачи (9), (10) (см. работы [12]):

$$(\frac{dy(t)}{dt},\eta) + \ell(t;y,\eta) = (f(t),\eta)$$

для любых элементов η из V. При этом имеет место (10).

Пусть заданы гильбертово пространство управлений U, U_{∂} – заданное подмножество U и линейный непрерывный оператор $B: U \to L_2(0,T;V^*);$ пусть далее $f \in L_2(0,T;V^*),$ $y_0 \in H$. Предположим, что выполнены условия (6), (7) и $y(\upsilon) \equiv y(x,t;\upsilon) \in L_2(0,T;V)$ – решение задачи

$$\frac{dy(\upsilon)}{dt} + A(t)y(\upsilon) = f + B\upsilon, \qquad (11)$$

$$y(\upsilon)|_{t=0} = y(x,0;\upsilon) = y_0,$$
 (12)

Функция $y(\upsilon)$ представляет собой состояние системы (11), (12), наблюдение $z(\upsilon)$ определяется линейным непрерывным оператором (оператор наблюдения) $C: W(0,T) \to \Upsilon$ (Υ – заданное пространство) и задается следующим образом: $z(\upsilon) = Cy(\upsilon)$.

Введем линейный непрерывный оператор $N: U \to U$ такой, что $(Nu, u)_U \ge v ||u||_U^2$ (v > 0). Минимизирующий функционал задается соотношением

$$J(v) = ||Cy(v) - z_0||_{\Upsilon}^2 + (Nu, u)_U.$$

Замечание 4. Оператор N берется достаточно большим (в смысле нормы), чтобы функционал $J(\upsilon)$ обладал свойством коэрцитивности, т.е. $J(\upsilon) \rightarrow +\infty$, если $||\upsilon||_{\upsilon} \rightarrow +\infty$; представление функционала $J(\upsilon)$ вышеприведенным соотношением не является единственным и используется здесь таковым лишь для иллюстрации идеи ислледования.

Задача оптимизации состоит в том, чтобы отыскать $\inf_{\upsilon \in U_{\partial}} J(\upsilon)$; элемент и, доставляющий инфинум функционалу $J(\upsilon)$, называется оптимумом.

В соответствии с предыдущими результатами имеет место

Теорема 4. Если оператор N ≠ 0, то существует единственное оптимальное управление. Как известно (см. [1, глава 1] и раздел 1

настоящей статьи) элемент и является оптимумом тогда и только тогда, когда

$$J'(\upsilon)(\upsilon-u) \ge 0$$

для любого $\upsilon \in U$; $J'(\upsilon)$ – производная Фреше функционала $J(\upsilon)$.

Лемма 1. Элемент и является оптимумом тогда и только тогда, когда

$$(Cy(u) - z_0, C(y(v) - y(u)))_{Y} + + (Nu, v - u)_U \ge 0$$
 (13)

для любых $\upsilon \in U_{\partial}$.

Доказательство очевидным образом вытекает из представления первого слагаемого функционала $J(\upsilon)$ через скалярное произведение в пространстве Υ .

Очевидно, неравенство (13) принимает вид

$$(C^{*}(Cy(u) - z_{0}), y(v) - y(u)) + (Nu, v - u)_{U} \ge 0$$
(14)

 $(C^* - \text{ сопряженный к } C \text{ оператор})$ для любых $\upsilon \in U_{\partial}$, при этом первое слагаемое в (14) является скалярным произведением элемента пространства $W^*(0,T)$ и элемента из W(0,T) ($W^*(0,T)$ – пространство, сопряженное к W(0,T)).

2.3. Сопряженное состояние. Введем сопряженное состояние системы (11), (12), которое, как нетрудно заметить, будет зависеть от представления оператора наблюдения *C*. При этом рассмотрим два достаточно распространенных в приложениях случая: распределенное и финальное наблюдения. Аналогичные рассуждения использованы в [13 – 15].

2.3.1. Распределенное наблюдение. Оператор C – линейное непрерывное отображение пространства $L_2(0,T;V)$ в Υ . Тогда $C^*: \Upsilon^* \to L_2(0,T;V^*)$ и неравенство (14) принимает вид

$$\int_{0}^{T} (C^{*}(Cy(u) - z_{0}), y(v) - y(u))dt + (Nu, v - u)_{U} \ge 0$$
(15)

для любых $\upsilon \in U$. Сопряженное состояние $\omega(\upsilon) \in L_2(0,T;V)$ системы (11), (12) определяется как решение на (0,T) уравнения

$$-\frac{d\omega(\upsilon)}{dt} + A^*(t)\omega(\upsilon) = , \qquad (16)$$
$$= C^*(Cy(u) - z_0)$$

с финальным условием

$$\omega(\upsilon)|_{t=T} = 0. \tag{17}$$

Лемма 2. Задача (11), (12) имеет единственное решение.

Доказательство становится очевидным, если заменить t на T - t.

Замечание 5. Эквивалентная вариационная форма записи задачи (16), (17) для элементов V при однородных краевых условиях имеет вид

$$-\left(\frac{d\omega(\upsilon)}{dt},\eta\right) + \ell^*(t;\omega(\upsilon),\eta) =$$
$$= (C^*(Cy(u) - z_0),\eta)$$

для любых элементов η из V. При этом имеет место (17).

Неравенство (15) можно преобразовать. Умножим (16) (v = u) на y(v) - y(u) и проинтегрируем от 0 до *T*. Заметим, что из полученных соотношений вытекает

$$-\int_{0}^{T} \left(\frac{d\omega(t)}{dt}, y(\upsilon) - y(u)\right) dt =$$

=
$$\int_{0}^{T} \left(\omega(u), \frac{d}{dt}(y(\upsilon) - y(u))\right) dt,$$

$$\int_{0}^{T} \left(A^*\omega(u), y(\upsilon) - y(u)\right) dt =$$

=
$$\int_{0}^{T} \left(\omega(u), A(y(\upsilon) - y(u))\right) dt,$$

а тогда

$$\int_{0}^{T} (C^{*}(Cy(u) - z_{0}), y(v) - y(u))dt =$$

$$= \int_{0}^{T} (\omega(u), \frac{d}{dt}(y(v) - y(u)) +$$

$$+ A(t)(y(v) - y(u)))dt =$$

$$= \int_{0}^{T} (\omega(u), B(v - u))dt =$$

$$= (B^{*}\omega(u), v - u)_{U} =$$

$$= (B^{*}\omega(u), v - u)_{U},$$

где $(B^*\omega(u), \upsilon - u)$ – скалярное произведение элементов U^* и U, соответственно. Отсюда следует, что неравенство (15) принимает вид

$$(B^*\omega(u),\upsilon-u)_U\geq 0 \quad \forall u\in U_{\partial},$$

для любых $\upsilon \in U_{\partial}$ и значит, справедлива

Теорема 5. Если C – оператор распределенного наблюдения системы (11), (12), то оптимум $u \in U_{\partial}$ характеризуется соотношениями

$$\frac{dy(\upsilon)}{dt} + A(t)y(\upsilon) = f + B\upsilon,$$

$$y(\upsilon)|_{t=0} y_0,$$
(18)

$$-\frac{d\omega(\upsilon)}{dt} + A^{*}(t)\omega(\upsilon) =$$

= $C^{*}(Cy(u) - z_{0}),$ (19)
 $\omega(\upsilon)|_{t=t} = 0,$

$$(B^*\omega(u), \upsilon - u)_U \ge 0 \quad \forall u \in U_{\partial}, \qquad (20)$$

 $z \partial e \ y(\upsilon), \omega(\upsilon) \in L_2(0,T;V)$.

Замечание 6. Соотношения (18), (19) в эквивалентной вариационной форме записи для

элементов V при однородных краевых условиях принимают вид

$$(\frac{dy(\upsilon)}{dt},\eta) + \ell(t;y(\upsilon),\eta) = (f + B\upsilon,\eta),$$

$$-(\frac{d\omega(\upsilon)}{dt},\eta) + \ell^*(t;\omega(\upsilon),\eta) =$$

$$= (C^*(Cy(u) - z_0),\eta)$$

для любых элементов η из V. При этом имеет место соотношения (12) и (17).

Замечание 7. Если U_{∂} совпадает с U, то неравенство (20) приводится к виду

$$(B^*\omega(u),\upsilon-u)_U=0 \quad \forall u \in U_{\partial}.$$

Отсюда определяется *u*, а оптимум получается из решения задачи

$$\frac{dy}{dt} + A(t)y + BN^{-1}B^*\omega = f,$$

$$y|_{t=0} y_0,$$
(21)

$$-\frac{d\omega}{dt} + A^*(t)\omega - C^*Cy = -C^*z_0,$$

$$\omega|_{t=T} = 0,$$
(22)

по формуле

$$u = -N^{-1}B^*\omega \tag{23}$$

2.3.2. Финальное наблюдение. Наблюдение $C y(\upsilon)$ определяется линейным непрерывным оператором $D: H \to H$ согласно соотношению $C y(\upsilon) = Dy(x,T;\upsilon)$. Функционал $J(\upsilon)$ имеет вид

$$J(v) = || Dy(\cdot, T; v) - z_0 ||_V^2 + (Nu, u)_U,$$

оптимизационная задача на множестве U_{∂} остается неизменной, а неравенство (15) трансформируется в неравенство

$$(Dy(T;u) - z_0,$$

$$Dy(T;v) - Dy(T;u))_H + (24)$$

$$+(Nu, v - u)_U \ge 0$$

для любых $\upsilon \in U_{\partial}$. Сопряженное состояние $\omega(\upsilon) \in L_2(0,T;V)$ системы (11), (12) в этом случае определяется как решение на (0,T) уравнения

$$-\frac{d\omega(\upsilon)}{dt} + A^*(t)\omega(\upsilon) = 0, \qquad (25)$$

с финальным условием

$$\begin{aligned} \omega(x,T;\upsilon)|_{t=T} &= \\ &= D^* D y(x,T;u) - z_0(x) \end{aligned}$$
 (26)

Лемма 3. Задача (11), (12) имеет единственное решение.

Для доказательства, как и в доказательстве леммы 2, достаточно заменить t на T - t.

Используя приведенные в п. 2.3.1 преобразования и учитывая соотношение

$$-\int_{0}^{T} (\frac{d\omega(t)}{dt}, y(\upsilon) - y(u))dt =$$

= $\int_{0}^{T} (\omega(u), \frac{d}{dt}(y(\upsilon) - y(u)))dt -$
- $(D^{*}Dy(T; u) - z_{0}, y(T; \upsilon) - y(T; u))_{H},$

получим

$$(Dy(T;u) - z_0, y(T;v) - y(T;u))_H =$$

= $\int_0^T (\omega(u), B(v-u))dt,$

значит, неравенство (24) примет вид

$$(B^*\omega(u) + Nu, \upsilon - u)_U \ge 0 \quad \forall \upsilon \in U_{\partial}.$$

Последнее приводит к следующему утверждению, аналогичному утверждению теоремы 4.

Теорема 6. Если C – оператор финального наблюдения системы (11), (12), то оптимум $u \in U_{\partial}$ характеризуется соотношениями

$$\frac{dy(\upsilon)}{dt} + A(t)y(\upsilon) = f + B\upsilon,$$

$$y(\upsilon)|_{t=0} y_0,$$
(27)

$$-\frac{d\omega(\upsilon)}{dt} + A^{*}(t)\omega(\upsilon) = 0,$$

$$\omega(x,T;\upsilon)|_{t=T} = (28)$$

$$= D^{*}Dy(x,T;u) - z_{0}(x),$$

$$(B^*\omega(u) + Nu, \upsilon - u)_U \ge 0$$

$$\forall \upsilon \in U_{\partial}.$$
 (29)

 $\label{eq:constraint} \mathcal{C}\mathcal{D}\mathcal{C}(\mathcal{V}), \boldsymbol{\omega}(\mathcal{V}) \in L_2(0,T;V) \ .$

Замечание 8 (аналогичное замечанию 7). Если U_{∂} совпадает с U, то оптимум получается из решения задачи

$$\frac{dy(\upsilon)}{dt} + A(t)y(\upsilon) + +BN^{-1}B^*\omega = f, \qquad (30)$$
$$y(\upsilon)|_{t=0} y_0,$$

$$-\frac{d\omega(\upsilon)}{dt} + A^{*}(t)\omega(\upsilon) -$$
$$-C^{*}Cy(u) = -C^{*}z_{0}, \qquad (31)$$
$$\omega(\upsilon)|_{t=T} = 0,$$

по формуле

$$u = -N^{-1}B^*\omega \tag{32}$$

3. Примеры задач оптимизации. Рассмотрим непосредственные приложения полученных в разделах 1 и 2 результатов, которые явились предметом исследований в ранних работах авторов [16, 17]. При этом анализируются эволюционные системы, пространственные переменные которых изменяются на сетях (графах) Г.

Оптимизация 3.1. эллиптической системы. Обозначим через ∂Г множество граничных, через $J(\Gamma)$ — множество внутренних узлов графа Г и пусть Г₀ — объединение всех ребер, не содержащих концевых точек, Каждое ребро γ графа Γ параметризуется отрезком [0,1] и параметром $x \in [0,1]$, ориентация ребер установлена в [2, с. 88]. Введем необходимые пространства [18, 19]: $H = L_2(\Gamma)$ простран-ство функций, на суммируемых квадратом Γ : с $U = L_2(\Gamma)$ (распределенное на Γ управление); $W^1(\Gamma)$ пространство функций ИЗ $L_2(\Gamma)$, имеющих обобщенную производную 1-го порядка по x также из $L_2(\Gamma)$.

Рассмотрим билинейную форму

$$\ell(\mu, \nu) = \int_{\Gamma} a(x) \frac{d\mu(x)}{dx} \frac{d\nu(x)}{dx} dx + \int b(x)\mu(x)\nu(x)dx,$$

коэффициенты a(x), b(x) — фиксированные измеримые ограниченные на Γ_0 функции, суммируемые с квадратом: $0 < a_* \le a(x) \le a^*$, $b_* \le b(x) \le b^*$, $x \in \Gamma_0$ (a_*, a^*, b_*, b^* — фиксированные постоянные). Очевидно, что форма $\ell(\mu, \nu)$ обладает (7). свойствами (6), Обозначим через $W_0^1(\Gamma) \subset W^1(\Gamma)$ пространство, являющееся замыканием в норме $W^{1}(\Gamma)$ множества гладких функций, удовлетворяющих соотношениям (условия согласования)

$$\sum_{\gamma_j \in R(\xi)} a(1)_{\gamma_j} \frac{du(1)_{\gamma_j}}{\partial x} =$$

$$= \sum_{\gamma_j \in r(\xi)} a(0)_{\gamma_j} \frac{du(0)_{\gamma_j}}{\partial x}$$
(33)

для всех узлов $\xi \in J(\Gamma)$ (существование таких функций показано в [1, с. 92]).

Пусть $V = W_0^1(a, \Gamma)$; B – тождественное отображение; C – вложение пространства V в H; $\Upsilon = H$.

Определим эллиптический оператор A соотношением

$$A = -\frac{d}{dx}(a(x)\frac{d\mu(x)}{dx}) + b(x)\mu(x)$$

Состояние $y(\upsilon) = y(x; \upsilon)$ определяется как решение задачи Дирихле:

$$Ay(\upsilon) = f + \upsilon, \ y(x;\upsilon)|_{\partial\Gamma} = 0.$$
(34)

Задача оптимизации системы (34) состоит в отыскании

$$\inf_{\boldsymbol{\upsilon}\in U_{\partial}} J(\boldsymbol{\upsilon}) = \inf_{\boldsymbol{\upsilon}\in U_{\partial}} \{ \int_{0}^{T} (y(x;\boldsymbol{\upsilon}) - z_{0}(x))^{2} dx + (Nu, u)_{H} \}$$

Сопряженное состояние $\omega(v) = \omega(x; v)$ системы (34) является решением краевой задачи

$$A^*\omega(\upsilon) = y(u) - z_0, \ \omega(x;\upsilon)|_{\partial \Gamma} = 0.$$

Применяя теорему 1 для случая $U_{\partial} = U$ (нет ограничительных условий на управляющее воздействие), получаем необходимые и достаточные условия существования оптимума u, т.е. систему для определения u. Оптимум системы (34) при этом имеет вид

$$u(x) = -(N^{-1}\omega)(x)$$
, (35)

где $\omega(x)$ задается решением $\{y(x), \omega(x)\}$ системы (см. раздел 1)

$$Ay + N^{-1}\omega = f,$$

$$A^*\omega - y = -z_0.$$

Замечание 9. Если $U_{\partial} \subset U$, то соотношение (32) заменяется неравенством $\int_{\Gamma} [\omega(u) + Nu](\upsilon - u)dx \ge 0$ для любого $\upsilon \in U_{\partial}$.

3.2. Оптимизация эволюционной системы. К обозначениям п. 3.1 добавим следующие. Через Γ_T обозначим область

$$\begin{split} \Gamma_{T} &= \Gamma_{0} \times (0,T) , \quad \text{причем} \quad \Gamma_{t} &= \Gamma_{0} \times (0,t) ; \\ \partial \Gamma_{T} &= \partial \Gamma \times (0,T) . \quad \text{Пусть далее} \quad L_{2}(\Gamma_{T}) & - \\ \text{пространство функций, суммируемых с квадратом} \\ \text{на} \ \Gamma_{T} \ (\text{аналогичное пространству} \ L_{2}(\Gamma) \); \ L_{2,1}(\Gamma_{T}) \\ - & \text{пространство функций из} \ L_{1}(\Gamma_{T}) \ \text{с нормой} \end{split}$$

$$\|f\|_{L_{2,1}(\Gamma_T)} = \int_0^T (\int_{\Gamma} f^2(x,t) dx)^{1/2} dt ; \qquad W_2^{1,0}(\Gamma_T) \qquad -$$

пространство функций $f(x,t) \in L_2(\Gamma_T)$, имеющих обобщенную производную 1-го порядка по x, принадлежащую $L_2(\Gamma_T)$,

$$\|f\|_{W_{2}^{1,0}(\Gamma_{T})}^{2} = \int_{\Gamma_{T}} \left(f(x,t)^{2} + \frac{\partial u(x,t)^{2}}{\partial x} \right) dx dt . \text{ Обозначим}$$

через $W_2^{1,0}(a, \Gamma_T) \subset W_2^{1,0}(\Gamma_T)$ пространство, являющееся замыканием в норме $W_2^{1,0}(\Gamma_T)$

множества гладких функций, удовлетворяющих аналогичным (33) условиям согласования

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

для всех узлов $\xi \in J(\Gamma)$ и для любого $t \in [0,T]$ (подробное описание таких пространств приведено в работах [1 - 3].

Пусть $H = L_2(\Gamma_T)$; пространство управлений $U = L_2(\Gamma_T)$; как и выше в п. 3.1: $V = W_0^1(a, \Gamma)$, B – тождественное отображение, C – вложение пространства V в H, $\Upsilon = H$. Состояние $y(\upsilon) = y(x,t;\upsilon)$ определяется как решение задачи

$$\begin{aligned} \frac{\partial y(\upsilon)}{\partial t} + A(t)y(\upsilon) &= f + \upsilon, \\ x, t \in \Gamma_T, \\ y(\upsilon)|_{t=0} &= y(x, 0; \upsilon) = y_0(x), \\ x \in \Gamma, \\ y(\upsilon)|_{\partial \Gamma} &= y(x, t; \upsilon)|_{\partial \Gamma} = 0. \end{aligned}$$
(36)

Задача оптимизации системы (36) состоит в отыскании

$$\begin{split} &\inf_{\upsilon \in U_{\partial}} J(\upsilon) = \\ &= \inf_{\upsilon \in U_{\partial}} \left\{ \int_{\Gamma_{T}} (y(x,t;\upsilon) - z_{0}(x,t))^{2} dx dt + . \right. \\ &+ (Nu,u)_{H} \left. \right\} \end{split}$$

Сопряженное состояние $\omega(\upsilon) = \omega(x, t; \upsilon)$ системы (36) определяется как решение задачи

$$-\frac{\partial \omega(\upsilon)}{\partial t} + A^{*}(t)\omega(\upsilon) =$$

= $y(\upsilon) - z_{0}, \quad x, t \in \Gamma_{T},$
 $\omega(\upsilon)|_{t=T} = \omega(x, T; \upsilon) = 0,$
 $x \in \Gamma,$
 $\omega(\upsilon)|_{\partial\Gamma} = \omega(x, t; \upsilon)|_{\partial\Gamma} = 0,$

Применяя теорему 1 для случая $U_{\partial} = U$ (нет ограничительных условий на управляющее воздействие), получаем необходимые и достаточные условия существования оптимума u, т.е. систему для определения u. Оптимум системы (36) (см. соотношение (35)) имеет вид

$$u(x,t) = -(N^{-1}\omega)(x,t), \qquad (37)$$

где $\omega(x,t)$ задается решением $\{y(x,t), \omega(x,t)\}$ системы

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} + A(t)y + N^{-1}\omega &= f, \\ -\frac{d\omega}{dt} + A^*(t)\omega - y &= -z_0, \\ y(\upsilon)|_{t=0} y_0, \quad \omega(\upsilon)|_{t=T} = 0, \end{aligned}$$

Замечание 10. Если $U_{\partial} \subset U$, то соотношение (37) заменяется неравенством $\int_{\Gamma_r} [\omega(u) + Nu](v - u) dx dt \ge 0$ для любого $v \in U_{\partial}$.

В работе развиваются 4. Заключение. некоторые методы решений начально-краевых задач для эволюционных уравнений с распределенными сетеподобных параметрами на областях (основополагающие формализмы математических моделей эволюционных процессов и явлений в сетеподобных объектах), используя так называемые сопряженные состояния таких задач. При этом принципиальное учитывается отличие OT классических подходов в понимании решения таких задач [20 - 24] - функции (отображения), используемые при интерпретации решений, не являются не гладкими (дифференцируемыми) только по пространственным переменным, но и подчас непрерывными. Изучаемые методы и подходы (ни в коей мере не являющиеся исчерпывающими) демонстрируются на конкретных примерах прикладного прикладных характера.

Полученные результаты являются основополагающими при исследовании оптимизационных задач разного типа, а именно, задачи устойчивости, оптимального управления, стабилизации [25 – 30]. Основными этапами решения (общая схема исследования) этих задач являются:

- анализ начально-краевых задач: однозначная разрешимость Слабая разрешимость), непрерывность по исходным данным, вопросы корректности постановок задач (корректность по Адамару),

- построение решения задачи оптимизации.

Литература

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

2. Подвальный, С.Л. Оптимизационные задачи для эволюционных систем с распределенными параметрами на графе [Текст] / С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов // Современные методы прикладной математики, тоерии управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2014) сборник трудов VII Международной конференции. - 2014. - С. 282-286.

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

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

5. Провоторов, В.В. Оптимальное управление параболической системой с распределенными параметрами на графе [Текст] / В.В. Провоторов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2014. - № 3. - С. 154-163.

6. Подвальный, С.Л. Стартовое управление параболической системой с распределенными параметрами на графе [Текст] / С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов// Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2015. - № 3. - С. 126-142.

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

8. Лионс, Ж.Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными [Текст] / пер. с фр. Н. Х. Розова; под ред. Р. В. Гамкрелидзе. М.: Мир. - 1972. - 414 с.

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

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

11. Провоторов, В.В. Спектральная задача на графе с циклом [Текст] / В.В. Провоторов // Дифференциальные уравнения. - 2010. - Т. 46. - № 11. - С. 1665.

12. Провоторов, В.В. Граничное управление волновой системой в пространстве обобщенных решений на графе графе [Текст] / В.В. Провоторов, Гнилицкая Ю.А. // Вестник Санкт-Петербургского университета. - Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2013. - № 3. - С. 112-120.

13. Подвальный, С.Л. Сопряженные системы и градиент при оптимизации динамических систем [Текст] / С.Л. Подвальный// Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. - Т. 8. - № 12-1. - С. 57-62.

14. Подвальный, С.Л. Особенности поисковой градиентной оптимизации сложных объектов с использованием сопряженных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т. 56. - № 2. - С. 18-22

15. Подвальный, С.Л. Решение задач градиентной оптимизации каскадно-реакторных схем с использованием сопряженных систем [Текст] / С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т.9. - №2. - С. 27-32.

16. Volkova, A.S. On the Solvability of Boundary-Value Problems for Parabolic and Hyperbolic Equations on Geometrical Graphs [Text] / A.S. Volkova, Yu.A. Gnilitskaya, V.V. Provotorov // Automation and Remote Control. - 2014. - T. 75. - \mathbb{N} 2. - C. 405-412.

17. Provotorov. V.V. Boundary control of a parabolic system with distributed parameters on a graph in the class of summable functions [Text] / V.V. Provotorov // Automation and Remote Control. - 2015. - T. 76. - N_{2} 2. - C. 318-322.

18. Podvalny, S.L. The questions of controllability of a parabolic systems with distributed parameters on the graph [Text] / S.L. Podvalny, V.V. Provotorov // В сборнике: 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP). - 2015. - C. 117-119.

19. Provotorov, V.V. Boundary control of a parabolic system with delay and distributed parameters on the graph [Text] / V.V. Provotorov // В сборнике: 2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP). - 2015. - С. 126-128.

20. Подвальный, С.Л. Модели многоальтернативного управления и принятия решений в сложных системах [Текст] / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Системы управления и информационные технологии. - 2014. - Т. 56, - № 2.1. - С. 169-173

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

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

23. Подвальный, С.Л. Модульная структура систем многоальтернативного моделирования процессов полимеризации [Текст] / С.Л. Подвальный, А.В. Барабанов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2013. - Т.9. - № 5-1. - С. 41-43.

24. Podval'ny, S.L. Intelligent Modeling Systems: Design Principles [Text] / S.L. Podval'ny, T.M. Ledeneva // Automation and Remote Control. - 2013. - Vol. 74. - № 7. - P. 1201-1210.

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

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

27. Веремей, Е.И. Многоцелевая стабилизация динамических систем одного класса [Текст] / Е.И. Веремей, В.М. Корчанов // Автоматика и телемеханика. - 1988. - № 9. - С. 126-137.

28. Веремей, Е.И. Стабилизация плазмы на базе прогноза с устойчивым линейным приближением [Текст] / Е.И. Веремей, М.В. Сотникова // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2011. - Вып. 1. - С. 116-133.

29. Карелин, В.В. Штрафные функции в задаче управления процессом наблюдения [Текст] / В.В. Карелин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. - 2010. - № 4. - С. 109-114.

30. Потапов, Д.К. Оптимальное управление распределенными системами эллиптического типа высокого порядка со спектральным параметром и разрывной нелинейностью [Текст] / Д.К. Потапов // Изв. РАН. ТиСУ. - 2013. - № 2. - С. 19-24.

Воронежский государственный технический университет Воронежский государственный университет

THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF DIFFERENTIAL SYSTEMS USING THE CONJUGATE STATES

S.L. Podvalniy, V.V. Provotorov

Presents a study of the optimization problem from the point of view of the analysis of States of the original and conjugate systems. The necessary and sufficient conditions for the existence and uniqueness of the solution to the problem of finding the optimum. The results are illustrated with examples from practice

Key words: optimization of associated systems, necessary and sufficient conditions for the existence of the optimum

О ПРИМЕНЕНИИ РАВНОМЕРНОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ БЛОКОМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С АВТОКОМПЕНСАЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ

С.В. Слесаренок, И.П. Шепеть, А.В. Захарин, В.И. Рубинов

Представлены результаты исследования возможных путей повышения точности автономного режима функционирования инерциальной навигационной системы путем управляемого вращения блоком чувствительных элементов. Предметом исследования является равномерный закон управления блоком чувствительных элементов. Представлены результаты исследования точностных характеристик инерциальной навигационной системы с программным вращением блока чувствительных элементов. Предъявлены требования к инерциальным датчикам

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, блок чувствительных элементов, пилотажнонавигационный комплекс

Введение

Одной из основных задач, решаемых в авиационной и ракетно-космической технике, а так же в системах ориентации морских объектов, является определение навигационных параметров движения. Автономный режим работы инерциальных навигационных систем (ИНС) позволяет осуществлять навигацию в отдаленных отсутствует устойчивое районах, гле радионавигационное обеспечение. Технические ИНС характеристики существующих в автономном режиме функционирования не позволяют обеспечить высокой точности определения навигационных параметров движения воздушного судна (ВС).

Повышение точности ИНС возможно двумя способами. Первый достигается повышением точности инерциальных измерителей [1]. Он требует высоких финансовых и трудовых затрат. Второй – структурно-алгоритмический, позволяет повысить точность автономного режима функционирования ИНС без высоких экономических затрат путем изменения методов обработки первичной навигационной информации с возможным незначительным изменением конструкции системы.

Основными ИЗ них являются: метол алгоритмической компенсации погрешностей инерциальных измерителей; метод статистической обработки инерциальной информации; метод структурной избыточности: метол автокомпенсации инструментальных погрешностей [2].

Простота реализации, несущественные конструктивные и технологические изменения

устройства ИНС, а также высокие точностные характеристики системы выделяют метол автокомпенсации инструментальных погрешностей ИНС. Он заключается в периодическом, заданном программно, вращении блока чувствительных элементов (БЧЭ) с целью преобразования монотонно возрастающих функций ошибок инерциальных датчиков в периодические функции с ограниченной амплитудой. Однако автокомпенсация может применяться в бесплатформенных ИНС (БИНС).

Целью работы является определение оптимального вида и оптимальных параметров закона управления БЧЭ.

1. Определение оптимальных параметров закона управления БЧЭ

В бесплатформенной инерциальной навигационной системе основными источниками ошибок являются лазерные гироскопы, которые совместно с акселерометрами объединены в блок чувствительных элементов. Для устранения постоянных и флуктуационных составляющих ошибок гироскопов необходимо поворачивать корпус БЧЭ относительно одной из осей вращения. Этот процесс будем называть автокомпенсацией. В процессе автокомпенсации относительно одной из осей вращения не устраняются те составляющие погрешностей чувствительных элементов, которые в проекциях на оси навигационной системы координат имеют постоянную или мелленно меняюшуюся величину. Выбор закона управления должен осуществляться таким образом, чтобы проекции погрешностей на оси навигационной системы координат не имели постоянной величины или были минимальны. При этом угловая скорость БЧЭ должна быть больше частоты Шулера в 1,5 ÷ 3 раза. В этом случае коэффициент передачи к ошибкам возмущений в ИНС от С инструментальных автокомпенсацией погрешностей аналогичного меньше коэффициента в обычной ИНС.

Поиск множества параметров управления осуществляемый с помощью тригонометрического многочлена позволяет перейти от оптимизации в функциональном виде к оптимизации в параметрическом пространстве.

Слесаренок Сергей Владимирович – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, доцент, тел. 8(919) 2493061, e-mail: sergulik@mail.ru

Шепеть Игорь Петрович – ТИС ДГТУ, канд. техн. наук, профессор, тел. 8(919) 7476598, e-mail: sergulik@mail.ru Захарин Александр Викторович – Краснодарское ВВАУЛ, канд. техн. наук, старший преподаватель, тел. 8(918) 4451590, e-mail: Siralex13@yandex.ru Рубинов Владимир Иванович – ВУНЦ ВВС «ВВА», канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры, тел. 8(980) 3481953, e-mail: rubinov777@mail.ru

 $\chi(t) = a_0 + a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t + ... + a_n \sin_n \omega t$, где $\chi(t)$ – закон управления БЧЭ, представляющий собой нечетную часть ряда Фурье.

Это возможно, когда вид управления определяется из физических соображений, а параметры находятся точно. Выбор периодической программы вращения обусловлен тем, что проекции погрешностей чувствительных оси навигационной элементов на системы координат должны иметь нулевое среднее, а это если модулирующие функции возможно, периодические.

Модулирующими функциями являются: $\sin \chi(t)$, $\cos \chi(t)$, $\chi \sin \chi(t)$, $\chi \cos \chi(t)$, χ . Модулирующие функции будут периодическими, если $\chi(t)$ также будет периодической. Периодичность $\chi(t)$ достигается двумя способами:

- в первом способе периодичность достигается за счет математического ограничения угла поворота БЧЭ и определения его в пределах [0 ... 360], т.е. $\alpha + n$ 360 = α , n = 1, 2, ... В этом случае закон управления можно представить в следующем виде:

$$\chi(t) = a_0,$$

где $a_0 = \omega_e$ – угловая частота вращения БЧЭ.

- во втором за счет изменения направления (реверса) пространственного вращения БЧЭ. Технически данный способ реализуется законом управления, представленным выражением:

$$\chi(t) = \sum_{\kappa=1}^{n} a_k \sin(k\omega t).$$

Для определения степени повышения точности опишем дисперсионными уравнениями базовую ИНС и управляемую [2]:

$$\dot{P}_{i} = F_{i}P_{i} + P_{i}F_{i}^{T} + G_{i}Q_{i}G_{i}^{T},$$
$$\dot{P}^{*} = F^{*}P^{*} + P^{*}F^{*T} + G^{*}QG^{*T}.$$

где P – ковариационная матрица ошибок управляемой ИНС (УИНС), * – соответствует дисперсионным уравнениям не управляемой ИНС, F – расширенная матрица состояния системы, описывающая динамику погрешностей ИНС с автономной компенсацией и динамику погрешностей измерительных элементов, G – матрица возмущающих воздействий, Q – матрица интенсивностей измерительных шумов.

В качестве критерия, определяющего степень повышения точности УИНС по сравнению с ИНС без вращения, выбрана интегрально-квадратичная сумма, которая с учётом рассматриваемых п ошибок, имеет вид:

$$Y = \sum_{i=1}^{n} \frac{\int_{t_0}^{t_0+t} P_{ii} dt}{\int_{t_0}^{t_0+t} P_{ii}^* dt},$$

Таким образом, показатель точности определяет во сколько раз УИНС точнее чем базовая ИНС без вращения БЧЭ.

Диагональными элементами ковариационных матриц P и P^* , определяющие точностные характеристики ИНС, выбирались следующие переменные: $P_{11} = \Delta \varphi$, $P_{55} = \Delta \lambda$ — ошибки определения координат, $P_{66} = \Delta V_x$, $P_{22} = \Delta V_y$ — ошибки определения составляющих скорости ВС, $P_{33} = \varepsilon_1$, $P_{44} = \varepsilon_3$, $P_{77} = \varepsilon_2$ — ошибки, определяющие ориентацию ВС.

В таком случае оптимальные параметры программы вращения БЧЭ определяются из условия:

$$u_{onm}(t) = \min_{n} Y(u),$$

где $R = [\Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta V_y, \Delta V_x, \Delta \varepsilon_1 \Delta \varepsilon_2, \Delta \varepsilon_3]^T$ – вектор ошибок УИНС, состоящий из ошибок по широте, долготе, определения составляющих скоростей ВС и углов ориентации, соответственно.

Применение автокомпенсации для ИНС с лазерными гироскопами среднего класса точности позволяет повысить точность определение координат в 1,6-1,8 раза.

В авиационных БИНС используются лазерные гироскопы с характеристиками СКО дрейфа гироскопов σ_{ω} и ошибки масштабных коэффициентов $\sigma_{K\omega}$ лежащими в пределах [0,01, ... ,0,1] и [1*10⁻⁵, ..., 1*10⁻⁴] соответственно [3].

На рис. 1 представлены параметры оптимальной угловой скорости вращения БЧЭ для выбранных диапазонов изменения ошибок гироскопов.



Рис. 1. Зависимость оптимальной угловой частоты вращения БЧЭ от изменения статистических характеристик гироскопов

2. Анализ полученных результатов

Оценка степени повышения точности БИНС с вращением БЧЭ по сравнению с базовой ИНС выполнялась из условия:

Y < 7 – повышение точности достигается;

Y = 7 – точностные характеристики УИНС и ИНС одинаковые

Y > 7 – точностные характеристики УИНС хуже чем у ИНС без вращения БЧЭ

На рис. 2 представлены числовые значения показателя точности, для оптимальных значений угловой скорости вращения БЧЭ и различных значений СКО гироскопов (дрейфа σ_{ω} и ошибки масштабных коэффициентов $\sigma_{\kappa_{\omega}}$) [4].



Рис. 2. Область оптимального применения равномерной программы вращения БЧЭ

Цветовая гамма графика позволяет судить о эффективности автокомпенсации инструментальных погрешностей УИНС.

Применение равномерного закона управления БЧЭ гироскопов лля с характеристиками, попадающими область в окрашенную белым цветом (Y≥7), будет не эффективно. Точностные характеристики УИНС будут хуже чем базовой ИНС. Соответственно, чем темнее область, тем больший эффект от автокомпенсации и тем меньше выходные ошибки УИНС. На этапе проектирования УИНС с применением равномерного закона управления необходимо выбирать гироскопы с точностными которых характеристиками при показатель точности будет удовлетворять условию Y < 7.

3. Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в процессе автокомпенсации при равномерном вращении БЧЭ относительно вертикальной оси с оптимальной угловой скоростью, указанной на рис. 1, эффективно ошибка вызванная дрейфом устраняется гироскопа. Ошибка масштабного коэффициента в процессе автокомпенсации с равномерным законом вращения не в полном объеме не устраняется, в результате чего, применение равномерного закона управления БЧЭ имеет ограничения. Максимальный эффект от процесса автокомпенсации будет достигаться в УИНС которые содержат гироскопы с характеристиками находящимися, на рис. 2, слева от пунктирной устранения этого недостатка пинии Для существует необходимость исследовать другие, например реверсивные виды законы управления БЧЭ.

Литература

1. Пат. 2362975 Российская Федерация, МПК G01C19/56, G01P9/04. Твердотельный волновой гироскоп / Бражнев С.М., Шепеть И.П., Онуфриенко В.В., Иванов М.Н., Бондаренко Д.В., Захарин А.В., Слесаренок С.В.; заявитель и патентообладатель Бражнев С.М., Шепеть И.П., Онуфриенко В.В., Иванов М.Н., Бондаренко Д.В., Захарин А.В., Слесаренок С.В.,-№ 2008100657/28. заявл. 09.01.2008, опубл. 27.07.2009, Бюл. № 21. – 8 с.

2. Использование фильтра Калмана для оптимизации комплексных навигационных систем [Текст] / А.Н. Хабаров, Д.В. Бондаренко, А.В. Захарин, С.В. Ипполитов // Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Сер. Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях. – 2014. – С. 183–187.

3. Пат. 2362977 Российская Федерация, МПК G01C21/10. Способ компенсации инструментальных бесплатформенных погрешностей инерциальных навигационных систем и устройство для его осуществления / Шепеть И.П., Онуфриенко В.В., Иванов М.Н., Бондаренко Д.В., Захарин A.B., Слесаренок С.В., Иванов И.М., Кучевский С.В., заявитель и патентообладатель Шепеть И.П. Онуфриенко В.В., Иванов М.Н., Бондаренко Д.В., Захарин A.B., Слесаренок C.B., №2008121099/28(024981). заявл. 26.05.2008, опубл. 27.07.2009. - 9 c.

4. Шепеть И.П. Дуальное управление по неполной информации в информационно-измерительных системах [Текст] / И.П. Шепеть, А.А. Варнавский // НаукаПарк. – 2013. Вып. 6 (16). – С. 113–117.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

Технологический институт сервиса (Филиал Донского государственного технического университета), г. Ставрополь

Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков

ABOUT APPLICATION OF THE UNIFORM LAW OF CONTROL OF THE BLOCK OF SENSITIVE ELEMENTS FOR THE INERTIAL NAVIGATION SYSTEM WITH AUTOCOMPENSATION OF ERRORS

S.V. Slesarenok, I.P. Shepet, A.V. Zakharin, V.I. Rubinov

Presented Results of research of possible ways of increase of accuracy of the autonomous mode of functioning of the inertial navigation system by the operated rotation are presented by the block of sensitive elements. An object of research is the uniform law of control of the block of sensitive elements. Results of research of precision characteristics of the inertial navigation system with program rotation of the block of sensitive elements are presented. Requirements are imposed to inertial sensors

Key words: inertial navigation system; inertial measurement units; integrated flight and navigation system
ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕТОДАМИ ЧИСЛЕННОЙ ДИНАМИКИ

Е.А. Ганцева, В.А. Каладзе, А.В. Шуляев

Численный анализ изображений сосудистых систем глазного дна с оценкой их морфологических признаков позволяет существенно повысить качество диагностики в офтальмологии и обеспечить автоматическую оценку состояния сосудистых систем. Исследования снимка глазного дна в работе проводятся на монохроматическом изображении, что значительно снижает трудоёмкость численного решения задачи выделения системы кровеносных сосудов, которое основано на применении разработанной динамической модели сосудистой системы в фазовом пространстве изображения

Ключевые слова: серый тон, фазовые траектории, адаптация

Проблема адаптивной кластеризации и динамической фильтрации изображения, рассматриваемая в данной работе, возникла при решении задачи оценки состояния сетчатки глаза (ОСГ), где достаточно мутный снимок глазного дна (рис. 1) требуется преобразовать в контрастное изображение с выделенной сетью кровоснабжения – крупных сосудов и капилляров (рис. 2).

В офтальмологической практике исследований сетчатки глаза к основным объектам исследования относятся кровеносные сосуды, оптический диск, макулярная область. Достаточно большой список работ посвящён аутентификации кровеносных сосудов глазного дна [1], в которых кровеносные сосуды рассматриваются как уникальный, легко различимый признак при условии обеспечения контрастности высокого уровня на изображении.





Рис. 1. Снимок глазного дна камерой

Рис. 2. Искомое изображение сети кровоснабжения

Результирующая процедура в задаче диагностики сетчатки глаза заключается в сличении снимка глазного дна пациента со снимком нормального состояния сетчатки, когда используется массив достоверной информации, полученной из снимка пациента, и формирование точного диагноза на его основе.

Для получения истинных данных о состоянии глазного дна пациента на основе традиционного подхода [2] была принята концепция проведения исследований, включающая выбор цветового пространства, преобразование хроматических характеристик исходного изображения в монохроматическое, нормализацию фона. контрастирование искомых объектов, селекцию элементов изображения, кластеризацию, их трассировку изображений сосудов, подбор и формирование адекватного математического аппарата.

Из-за неоднозначной терминологии в задачах числовой обработки цветовых изображений уточним необходимые понятия.

В работе использована терминология по координатным цветовым пространствам, принятая Международной комиссией по освещению (CIE) и стандартизованная [3].

В настоящее время численная оценка состояния сетчатки глаза проводится в 3-х компонентных аддитивных, линейных цветовых координатных системах (пространствах). Наиболее физиологичным считается пространство RGB с базисными векторами (R,G,B) [4], являющееся международной координатной колориметрической системой, в которой любой измеряемый цвет, в соответствии с экспериментально выверенным законом Юнга-Гельмгольца, может быть получен из линейной комбинации трёх базисных цветов. Так любая точка искомого цвета в координатном пространстве RGB может быть представлена цветовой точкой с барицентрическими координатами (r`,g`,b`), оцениваемыми по цветовым шкалам, или представлена цветовым векторным уравнением [5]

$$S = \mathbf{r} \mathbf{R} + \mathbf{g} \mathbf{G} + \mathbf{b} \mathbf{B}.$$
(1)

При необходимости эти координаты можно пересчитать в международную цветовую систему XYZ, из которой легко можно перейти в любое другое цветовое пространство.

Численное описание цветового изображения, использующего три числовых матрицы цветовых компонент, содержащие данные базисных цветов, приводит к большому числу расчётов, экспоненциально связанному с количеством базовых цветов (3). Соответственно, при расчётах

Ганцева Екатерина Александровна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail:caladze@yandex.ru

Каладзе Владимир Александрович – МИКТ, д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник, e-mail: wakaladze@yandex.ru Шуляев Антон Владимирович – ВИВТ, аспирант, e-mail: a.v.shulyaev@yandex.ru

возникает необходимость применения технологий параллельных вычислений. Более того, цветовые координатные системы нелинейны, что выражается в неравномерности (неодинаковости) расстояний в их цветовых координатах.

С точки зрения сложности алгоритмов расчёта и величины потребного машинного времени численные исследования и преобразования изображения выгоднее проводить на монохроматических изображениях с одним цветовым каналом, представляемых одной числовой матрицей, чем на полноцветных – с тремя матрицами.

Для такого перехода удобна 3-х компонентная HSB, представленная тоном система (Hue), насыщенностью (Saturation) и яркостью (Brightness), которая, если заменяется интенсивностью (Intensity), приводит к названию системы HSI [6].

Тон насыщенность И определяют хроматическую составляющую пвета. а интенсивность является ахроматической [4], составляющей которая определяет так называемую серую шкалу Greyscale.

описания Кроме того, для мощности пространстве наблюдаемого цвета в RGB используется, так называемая, координата яркости

$$Y' = 0.299R_a + 0.587G_a + 0.114B_a , \qquad (2)$$

выражающая его интенсивность через регистрируемые цветовые амплитуды смешиваемых базисных цветов R_a , G_a , B_a .

Эта зависимость определяет основной показатель, который в данной ситуации является единственной числовой характеристикой точки монохроматического изображения, представляющей величину интенсивности тона выбранного цвета.

Наиболее приемлемым в данной задаче следует считать переход к серой тональности, поскольку в этом случае сохранится баланс между цветами исходного снимка, и преобразованное изображение уравновесится без потери существенных элементов.

В пользу перехода к серому монохрому говорит и тот факт, что разброс цветовых характеристик сосудов относительно их основного цвета достаточно мал и отличается в Greyscale только значениями амплитуд интенсивности.

Понятие «серый тон» определяется как разреженный чёрный цвет различной плотности. Интенсивность поля серой шкалы – это плотность серого тона, количество равномерного чёрного. рис. 3, Серая представленная шкала, на рассматривается как упорядоченный ряд равновеликих полей изобразительных плотностей серого тона, предназначенный для определения количественной характеристики тонопередачи элементов изображения. Значения оттенков (градаций) полей серой шкалы иногда выражают в долях или процентах.

Рис. 3

В органолептической практике пользуются 10-польной шкалой (со светлотами), где градации соседних полей отличаются друг от друга в два раза, например, $P = \{0.0015, 0.003, 0.006, 0.012, 0.025, 0.05, 0$ 0.1, 0.2, 0.42, 0.85.

Информационная точность сохранения изображения при переходе от полноцветного изображения к монохроматическому серому определяется количеством оттенков, т.е. полей серой шкалы.

Для высокоточного численного описания серых изображений используется шкала. составленная из значений функции интенсивности серого тона, которая определена в вершинах *n*мерного бинарного куба. Значения этой функции представляют собой десятичные формы соответствующих двоичных значений аргумента.

Следовательно, область определения функции интенсивности представляет собой бинарную сетку, в строках которой расположены *n*-разрядные бинарные кортежи, устанавливающие разрядность цифрового изображения и используемые для кодирования цвета точки (единичного пикселя). Они составляют упорядоченное множество мощности 2^n , размерность вектора значений И функции интенсивности поэтому равна 2ⁿ. Каждой точке изображения ставится в соответствие один кортеж, представляющий величину амплитуды серого тона в этой точке.

В компьютерной реализации серой шкалы часто используют на каждый пиксель изображения 8-разрядный бинарный кортеж – 8 бит информации, что обеспечивает высокое тоновое разрешение изображения. Такая шкала передаёт 256 = 2⁸ градаций серого тона, где 0 соответствует белому цвету, а 255 - чёрному. Если оценивается не плотность чёрного цвета, а яркость белого, то базовая форма шкалы инвертируется.

Для сравнения – цветовое 8-разрядное изображение содержит по 265 градаций в матрице каждой из трёх координат пространства RGB (красной, зелёной, синей), т.е. в общей сложности

 $(256 \times 256 \times 256) = 16777216$ (3)

цветовых комбинаций.

В работе используется базовая форма, поскольку значения амплитуд плотностей чёрного цвета являются характеристикой интенсивности искомого изображения.

Поскольку в задаче оценки состояния глазного дна надо выделить искомые объекты, и если они закрашены определённым, титульным цветом, как кровеносные сосуды, то для повышения значений интенсивности серого на этих объектах следует ввести поправку, повышающую компоненту цвета искомого объекта изображения в уравнении интенсивности. Такой подход изначально увеличит контрастность искомого объекта тонального изображения. Эти преобразования фактически

являются аналогом применения оптических фильтров.

Следует также отметить, что вместе с преобразованием полноцветного изображения в монохроматическое, существует возможность и обратного преобразования.

Исходя из этих соображений, в работе исследуется монохроматическое изображение, состоящее из градаций серых тонов и не несущее в себе участков цветовой гаммы. Для хранения полученных изображений серого тона используется формат TIFF, позволяющий сохранять точные их колометрические характеристики и импортировать растровые изображения в градиентные.

Сравнительная характеристика элементов изображения – контрастность определяется как производная интенсивности, поскольку представима разностью между амплитудами соседних точек и может рассматриваться как дифференцированная характеристика яркости соседних точек или целых объектов исследуемого изображения.

Область исследований в данной задаче – плоское поле монохроматического изображения (Пи), полученного из единственного цветового снимка, с числовой матрицей I, рассматриваемого как полезный сигнал на фоне статистического шума. Объекты исследования – точки и группы точек с числовой характеристикой интенсивности.

Контрастное отличие точки u_0 от других точек на Пи можно определить как среднеквадратическое отклонение или модуль разности амплитуд, поскольку контрастность – чётная функция.

Схожие задачи решают техническим применением библиотечных процедур Computer Vision, позволяющих выделять границы объектов изображения. Но специфика задачи ОСГ определяет её особое место среди задач выделения текстуры, водяных знаков, распознавания лиц и т.п. В ней не предполагается наличия опорных точек или псевдопериодичности структуры искомого «иероглифа» на Пи, также отсутствуют регулярные закономерности поведения полезного сигнала.

В большинстве работ нормализация фона решается применением традиционной фильтрации. Так фильтр на базе оператора скользящего среднего позволяет настраивать размер окна фильтрации в соответствии с толщиной сосуда, а его многократное применение повышает точность кластеризации [7], но он не улавливает сложное поведение траекторий и не определяет точки ветвления.

Применяемый в комплексной области фильтр Габора с ядром Фурье [8], как и его вещественная проекция. предназначен выделения для стационарных закономерностей; соответственно, он эффективен при обработке изображений С квазипериодической структурой, т.к. пространство Габора – это свёртка ядра фильтра с периодическим сигналом. Сложность расчётов при большом числе итераций приводит к высокой трудоёмкости алгоритмов на его основе.

В работе предложена дифференциальная форма математической модели, где кровеносные сосуды, форма которых определяется случайным направлением, рассматриваются как траектории динамического случайного процесса (ДСП) [9], основная тенденция которого может быть описана дифференциальной зависимостью вида

$$D^{(n)}(x,y) = 0, (4)$$

при n < 4, или системой уравнений в нормальной форме y' = f(x,y).

В такой постановке решение задачи традиционно рассматривается на комплексной интерпретация плоскости, геометрическая а решения представляет собой поле изоклин. Данная работа проводится в пространственно-временной области, а не в частотно-временной; а поскольку задача ставится на дискретном множестве, то и решается в конечноразностной форме. Но в случаях используется допустимых дифференциальная терминология.

Рассмотрение кровеносных сосудов, как интегральных кривых математической модели (аналитических функций), на которые расслаивается исследуемая Пи в окрестности каждой точки (x,y,y'), позволяет считать, что на Пи задаётся поле изоклин f(x,y) = k = tg(a), где a – угол наклона изоклины. В зависимости от близости числовых значений параметра k в наборе можно регулировать плотность семейства интегральных кривых в исследуемой окрестности и обеспечивать точность фильтрации.

Параметризуя (от t) координаты точки (x,y), рассмотрим Пи как фазовую плоскость, а изображающие сосуды интегральные кривые как фазовые x = x(t)y = y(t)траектории динамической системы. В дискретном случае параметр t представляет собой индекс точки фазовой траектории, а набор числовых значений параметра *k* определяет систему эквидистантных точек окна фильтрации, при этом указывает на качественные особенности траекторий решений: k = 0 определяет экстремумы траектории, а y'' = 0 – точку перегиба. В точках ветвления сосудов происходит нарушение аналитичности интегральной кривой, что можно рассматривать как точки пересечения изоклин.

Для глобальной и локальной моделей системы кровеносных сосудов (СКС) с одним корневым узлом в качестве аналога выбрана классическая динамическая система – брюсселятор [10, 11] с искомыми функциями x(t) и y(t) и параметром μ

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -(\mu+1)x + x^2y + 1, \\ \frac{dy}{dt} = \mu x - x^2y. \end{cases}$$
(5)

Графическим представлением решения этой системы ОДУ на фазовой плоскости *x*0*y* может быть рис. 4.



На рис. 4 представлен график интересующего нас фазового портрета брюсселятора при $\mu = 0.5$ с несколькими траекториями (для разных начальных условий), которые асимптотически стремятся к одной и той же точке – устойчивому узлу. Данный аттрактор соответствует корневому узлу локальной или глобальной модели системы кровеносных сосудов. В глобальной модели корневому узлу сопоставлен оптический диск. Однако, не углубляясь в формализм, отметим, что количество начальных точек решения будет соответствовать числу концевых «отрезков» рассматриваемой системы кровеносных сосудов. Следует учитывать, что начиная с бифуркационного значения параметра $\mu = 2$, узел фазового портрета вырождается в предельный цикл. Этот случай не представляет интереса на данном этапе работы, но может быть использован при поиске патологических зон.

Кроме того, фазовый портрет с градиентными переходами серого тона в точках траекторий (рис. 4) удобно использовать при фильтрации и реконструкции морфологии сосудов в точках Пи.

Дискретность динамической задачи, в которой точки на изображении выделены конечными растровыми геометрическими границами (так называемые пиксели), приводит к поиску решения на множествах точек Пи $Э = {$ эквидистантных $\}$ и $P = {$ радиальных $\},$ с использованием множества точек F = {окна} фильтрации и результирующего множества $\Phi = \{$ отклика $\}$ процедуры фильтрации, как множества отображения точек первых двух множеств. Термином «пиксель» при необходимости будем пользоваться в случаях дискретного представления Пи или рассмотрения изображения на мониторе.

В условиях дискретизации Пи окрестность E_{0r} исследуемой точки x_0 рассматривается как множество наборов эквидистантных $\{e_i\}$ и радиальных $\{r_i\}$ точек относительно центровой точки u_0 модели объекта. С этой целью, для визуализации E_{0r} и расчётов используется схема, представленная на рис. 5.

Для количественных оценок множества E_{0r} и его подмножеств воспользуемся двумя леммами, которые легко доказываются методом

математической индукции, а для небольших значений *r* – очевидны.

5										5	
	4								4		
		3						3			
			2				2				
				1		1					
					u ₀						
				1		1					
			2				2				
		3						3			
	4								4		
5										5	

Рис. 5. Множество E_{0r} точки u_0 с радиальным расстоянием r = 5

Лемма 1. Мощность r-го множества эквидистантных точек E_r равна увосьмирённому радиальному расстоянию.

Лемма 2. Мощность множества точек E_{0r} , эквивалентного *r*-окрестности точки u_0 радиуса $r_n = r$, равна

$$|E_{0r}| = 8 \sum_{i=1}^{n} r_i .$$
 (6)

В самом деле, для конкретного случая, представленного на рис. 5

 $|E_{05}| = 8(1+2+3+4+5) = 120$.

Динамический фильтр (ДФ), отслеживающий поведение траекторий ДСП [12], с экспоненциальным ядром в численной, дискретной форме, имеет, в соответствии с требованием к (4), третий порядок из-за сложной конфигурации сосудов:

$$f_{i+1} = \sum_{k=0}^{3} \frac{1}{k!} f_{i}^{(k)} = \sum_{k=0}^{3} \frac{1}{k!} \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^{k} \psi_{i}^{k} , \qquad (7)$$

$$f_i = \psi_i^o = 4S_i - 6S_i^2 + 4S_i^3 - S_i^4 , \qquad (8)$$

$$\psi_i = 6S_i - 14S_i^2 + 11S_i^3 - 3S_i^4 , \qquad (9)$$

$$\psi_i^2 = 4S_i - 11S_i^2 + 10S_i^3 - 3S_i^4 , \qquad (10)$$

$$\overset{3}{\psi}_{i} = S_{i} - 3S_{i}^{2} + 3S_{i}^{3} - S_{i}^{4} ,$$
 (11)

где
$$S_i^{k+1}(z) = (1-\alpha)S_{i-1}^{k+1}(z) + \alpha S_i^k$$
, (12)

 $\alpha \in (0,1)$, $S_i^0 = z_i$.

l

Помимо отслеживания эволюционирующих траекторий, алгоритм динамической фильтрации позволяет выровнять, сделать однородной интенсивность фона изображения. Фильтрация проводится на множестве E_{0r} по амплитудам пикселей, расположенных на эквидистантных и радиальных направлениях относительно точки u_0 .

В алгоритме используются две матрицы: матрица монохроматического изображения Iразмерности $M \times N$ (исходные данные) и матрица окна фильтра F размерности $(2r + 1) \times (2r + 1)$ для размещения оперативных данных процедуры фильтрации, содержащая текущие оценки характеристик исследуемой точки и её окрестности, где M, N – количества точек по краям изображения; 8r – ранг множества *r*-эквидистантных точек, *r* – радиус эквидистантности. Результаты итераций размещаются в числовой маске *T* матрицы *I* на месте отображаемых значений.

Фильтрация проводится как по точкам, эквидистантным относительно центра окна фильтрации, так и по радиальным точкам матрицы F. По краям Пи оценки получаются с меньшей точностью за счёт существования там «мёртвой зоны», связанной с уменьшения числа степеней свободы в используемых граничных выборках. Повысить точность оценок на границах поля изображения можно за счёт применения экстраполирующей процедуры в динамическом фильтре.

В целом процесс кластеризации на Пи, кроме первого уровня динамической фильтрации. содержит ещё два уровня. На втором уровне проводится селекция точек двумя процедурами, по результатам сравнения которых формируется текущий для данного этапа набор объектных кластеров. Первая процедура определяет в соответствии с селективными признаками принадлежность точки одному из кластеров контрастности. Вторая процедура выполняется по правилу парных сравнений. Для этого формируется треугольная матрица сравнений, в которой величина приоритета определяется на основе бинарного отношения пар точек с минимизацией расстояния между ними, при этом одна из них заведомо принадлежит одному из объектных кластеров [13].

Для обеспечения необходимой контрастности отклика, полученного по результатам динамической фильтрации, можно использовать любой из двух наборов селективных порогов: $\Pi_1 = \{1,0.5,0\}$ и $\Pi_2 = \{1,0\}$ с их соответствующей интерпретацией: либо $\Pi_1 = \{"$ чёрный", "серый", "белый"}, либо $\Pi_2 = \{"$ чёрный", "белый"}.

Макрошаг (назовём его эпохой) третьего уровня включает в себя повтор двух предыдущих уровней, исходными данными для которого являются результаты предыдущей эпохи. На этом уровне происходит адаптация полученной на предыдущем уровне системы кластеров.

Множество полученных на двух уровнях результатов является исходным для финальной процедуры – трассировки русел сосудов кровеносной системы, позволяющей отделить возможные пространственные наложения различных русел, не допуская их слияния.

Литература

1. American Academy of Ophthalmology, Ophthalmic Pathology // In Basic and Clinical Science Courses. – 1991. – Section 11. - 179 p.

2. Goldbaum, M. Automated diagnosis and image understanding with object extraction, object classification, and inferencing in retinal images / M. Goldbaum, S. Moezzi, A. Taylor, S. Chatterjee, J. Boyd, E. Hunter, R. Jain // IEEE conference on ICIP. – 1996. – Vol. 3. – P. 695-698.

3. ГОСТ Р ИСО 9241-8-2007 (Стандарт на цветные изображения).

- 4. http://avtocvet.net/stati/statcolor/statcolor2.php
- 5. <u>http://femto.com.ua/articles/part_1/1692.html</u>
- 6. <u>http://aco.ifmo.ru/el_books/image_processing/3_02.</u>

html 7. http://habrahabr.ru/post/259017/

Сойфер В.А. Методы компьютерной обработки изображений / В.А. Сойфер. – М.: Физматлит, 2003. – 459 с.

9. Каладзе, В.А. Алгоритмические модели и структурные функции динамических случайных процессов [Текст] / В.А. Каладзе // Системы управления и информационные технологии. – 2010. – № 3 (41). – С. 4-7.

10. Пригожин, И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой [Текст] / И. Пригожин, И. Стенгерс. – Париж, 1979. (русский перевод 1986 г.)

11. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979.

12. Kaladze, V.A. Mathematical models of casual processes with stationary increments and the non-uniform information dynamic processing: Monograph. – Lorman, MS, USA: Science Book Publishing House, 2012. -136 p.

13. Подвальный, С.Л. Многоальтернативность как основа обеспечения интеллектуальности систем управления [Текст] / С.Л. Подвальный, Т.М. Леденева // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2012. – Т. 8. - № 11. - С. 17-23.

Воронежский государственный технический университет Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж Воронежский институт высоких технологий

EXPOSITION OF OBJECTS OF THE IMAGE OVER METHODS OF NUMERICAL DYNAMICS

E.A. Gantseva, V.A. Kaladze, A.V. Shulyaev

The numerical analysis of images of vascular systems of an eye bottom with an estimation of their morphological indications allows to raise essentially quality of diagnostics in ophthalmology and to ensure an automatic estimation of a condition of vascular systems. Researches of a picture of an eye bottom in work are spent on the monochromatic image, that considerably reduces labour input of a numerical solution of a problem of allocation of system of blood vessels which is based on application of the developed dynamic model of vascular system in an image phase space

Key words: grey tone, phase trajectories, adaptation

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ «МЕДИКО-СОЦИАЛЬНАЯ КАРТА РЕБЕНКА» ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОЦЕССА РЕАБИЛИТАЦИИ ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗДОРОВЬЯ

Т.А. Хорошева, М.А. Новосельцева

В работе описывается процесс инфологического моделирования и реализации базы данных «Медико-социальная карта ребенка» с графическим интерфейсом пользователя для процесса медико-социальной реабилитации детей и подростков с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов. База данных предназначена для специалистов реабилитационных центров и обеспечивает информационное сопровождение индивидуальных программ реабилитации

Ключевые слова: база данных, реабилитационный центр, графический интерфейс пользователя, медикосоциальная карта ребенка, индивидуальная программа реабилитации

По официальной статистике в настоящее время более 540 тысяч детей, проживающих в России, относятся к категории лиц с ограниченными возможностями здоровья [6]. В последние годы количество детей с ограниченными возможностями здоровья увеличивается на 3-10 % каждый год. С 2011 года в Российской федерации реализуется федеральная целевая программа «Доступная среда», целью которой является улучшение положения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в обществе. Комплексная меликосоциальная помощь детям и подросткам с ограниченными возможностями здоровья и их специализированных семьям оказывается в реабилитационных центрах (РЦ) на основе индивидуальной программы реабилитации (ИПР). г. Кемерово реабилитацией В летей с ограниченными возможностями здоровья занимается Муниципальное учреждение «Центр реабилитации детей и подростков с ограниченными «Фламинго», возможностями обеспечивая максимально полную И своевременную их адаптацию к жизни [5].

Основным инструментом в вопросе информационного обеспечения реабилитационной деятельности в таких учреждениях является система мониторинга информационных потоков процесса реабилитации. Анализ информационных потоков позволяет выявить схему работы объектов управления, а также обеспечивает информационное отображение объекта управления, взаимосвязь между его элементами [1]. Под информационным случае, потоком, данном понимается, в совокупность медицинских, психологических, социально-педагогических сведений, а также сведения о мерах социальной поддержки, о семье, об образовании и данные идентификационного характера. Анализ информационных потоков осуществлялся на основе документированной и недокументированной информации, сопровождающей реабилитационный процесс. потоков Структурная схема информационных реабилитационного процесса изображена на рис. 1. В качестве внешних информационных потоков представлены: нормативно-правовая документация, являющаяся основой деятельности организаций (положения, нормы, стандарты и т. д.); отчетная документация о проделанной работе (отчеты, выписки, оценки эффективности и т.д.). Внутренними информационными потоками являются: сведения о ребенке, направляемом на реабилитацию; результаты оценки состояния ребенка, проводимые специалистами центра (врачами, психологами, социальными педагогами); результаты реализации ИПР.



Рис. 1. Структурная схема информационных потоков

Следующим этапом анализа информационных потоков является построение инфологической модели «сущность-связь» (Entity-Relationship) в нотации П. Чена, анализ которой позволяет выявить информационные взаимосвязи между объектами мониторинга и систематизировать процесс сбора, обработки информации и ее хранения (рис. 2). Модель приведена без указания атрибутов сущностей.

Хорошева Татьяна Александровна - КемГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: tkhorosheva@yandex.ru

Новосельцева Марина Александровна - КемГУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: man300674@gmail.com



Рис. 2. Инфологическая модель «сущность-связь» процесса реабилитации

В рамках социального партнерства РЦ «Фламинго» и Кемеровского государственного университета решается задача по разработке программных средств информационного обеспечения реабилитационного процесса. Результатом сотрудничества является создание и внедрение в работу РЦ автоматизированной базы данных «Медико-социальная карта ребенка» [4].

База данных «Медико-социальная карта ребенка» предназначена лля автоматизации информационного сопровождения курсов реабилитации детей и подростков с ограниченными возможностями в условиях специализированных центров и обеспечивает хранение, накопление, обновление и поиск по данным медико-социальной, психолого-педагогической и социально-трудовой реабилитации.

В результате разработки базы данных автоматизируется обработка следующих информационных потоков:

 персональная информация о ребенке и его семье (социальный паспорт семьи и ребенка);

 информация о текущем состоянии ребенка в данный период реабилитации;

данные о предыдущих курсах реабилитации и их результатах;

отчеты о результатах проведения ИПР.

Следующим шагом информационного моделирования является построение ER-модели в нотации Баркера, описывающей структуру базы данных (рис. 3).

В качестве средства для реализации базы данных была выбрана СУБД Microsoft Access, которая имеет достаточно высокие скоростные характеристики и входит в состав популярного пакета Microsoft Office [3]. Набор команд и разработчиками функций. предлагаемых программных продуктов в среде Microsoft Access, по отвечает большинству мощи и гибкости современных требований к представлению и обработке данных.

В ходе реализации ER-модели средствами реляционной СУБД Microsoft Access были разработаны структуры 22-х таблиц, а также схема данных, отражающая структуру связей между таблицами. Для разработки графического интерфейса пользователя для базы данных была выбрана среда разработки Embarcadero Delphi XE версии 7 [2].



Рис. 3. ER-модель базы данных «Медико-социальная карта ребенка»

Среда разработки Embarcadero Delphi XE имеет встроенные механизмы, обеспечивающие полную поддержку платформ и версий всех основных баз данных, в том числе и Microsoft Access; позволяет разрабатывать приложения с полнофункциональным пользовательским интерфейсом, добиваясь при этом максимального быстродействия и компактности приложений. Разработанное приложение представляет собой единый исполняемый файл.

Интерфейс к базе данных «Медикосоциальная карта ребенка» состоит из 28 экранных форм. Рассмотрим интерфейс некоторых пунктов меню наиболее часто используемых в работе специалистов. Работа с базой данных начинается с заполнения данных о ребенке, поступившем на реабилитацию, в форме «Дети», являющейся элементом пункта меню «Справочники» (рис. 4).

040		Лата рожления	Annec	Tenetou	
Балахина Ксения Оле	говна	18, 10, 1993	пр. Комсомольский 49а-74	(901)061-6161	
Биктиниров Никита Р	авильевич	15.05.1994	ул. Патриотов 27-4	(910)641-6166	
Каюкова Виктория Ви	тальевна	23.12.1993	ул. Леонова 96-40	(908)361-5613	
Селищева Анна Серге	евна	19.10.1995	ул. Смирнова 16-1	(913)056-1616	
Хохлова Наталья Иго	ревна	18.11.1998	ул. Шахтер 137-5	(912)616-1316	
640- Балаучна I	Серика Орегорија		0	18 10 1993	
ФИО: Балахина І	Сения Олеговна	3	Дата рожден	ия: 18.10.1993	

Рис. 4. Форма «Дети»

Назначение ИПР производится в пункте меню «Курсы» (рис. 5).



Рис. 5. Форма «Курс реабилитации»

ИПР фиксируется в трех блоках, связанных единым интерфейсом: медико-социальной реабилитации (данные осмотров и назначений врача ЛФК, невролога, педиатра И физиотерапевта); психолого-педагогической реабилитации (данные наблюдений психолога, логопеда, социального педагога); социальнотрудовой реабилитации (информация о досуговых мероприятиях, изостудиях, музыкальных студиях, студиях, направленных на ручной труд ребенка) (рис. 6). Один ребенок может проходить реабилитацию неоднократно.



Рис. 6. Форма «Осмотр логопеда»

Информация о курсах, назначенных процедурах и результатах ИПР сохраняется в базе данных и может быть использована для анализа и принятия врачебных решений. Интерфейс медико-социальной карты ребенка дает возможность работы с графическими данными, например, на форме назначений врача ЛФК есть возможность выделения необходимых областей на макетах при помощи мыши (рис. 7).



Рис. 7. Форма «Назначения врача ЛФК»

В медико-социальной карте ребенка реализована возможность создавать автоматические отчеты по каждому курсу реабилитации, а также возможность экспорта отчетов в формат .pdf для дальнейшей печати (рис. 8).



Рис. 8. Отчет «Социальный паспорт ребенка»

Таким образом, медико-социальная карта ребенка, представляющая собой базу данных с графическим интерфейсом пользователя, разработана для полноценного информационного сопровождения всего курса реабилитации, начиная с

Кемеровский государственный университет

первичного приема, консультаций и до полного окончания курса. Использование базы данных в работе специалистов РЦ оптимизирует сбор и анализ информации о детях, проходящих ИПР; повышает оперативность работы и согласованность информации; благодаря справочникам уменьшает риск ошибок при добавлении и редактировании информации; обеспечивает возможность быстрого поиска информации; позволяет сократить время, затрачиваемое специалистами на работу информацией, автоматического путем формирования необходимой отчетности.

Литература

1. Антонов, А.В. Системный анализ [Текст]: учеб. для вузов / А.В. Антонов. - М.: Высш. ШК., 2004. - 454 С.

2. Белов, В.В. Программирование в DELPHI: процедурное, объектно-ориентированное, визуальное [Текст] : учебное пособие / В.В. Белов, В.И. Чистякова - М.: Горячая линия-Телеком, 2014. – 240 с.

3. Зыков, Р. И. Системы управления базами данных [Текст] / Р.И. Зыков. - М.: Лаборатория книги, 2012. – 162 с.

4. Новосельцева, М.А. «Медико-социальная карта ребенка (МСКР): Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015621732 / М.А. Новосельцева, Т.А. Хорошева, Е.Н. Калугина; КемГУ. - № 2015621732; заявл. 22.07.2015; Зарегистрировано в Реестре баз данных, г. Москва, 04 декабря 2015 г.

5. Официальный сайт социально-реабилитационного центра «Фламинго» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. Кемерово, 2016. URL: http://flamingo42.ru. (дата обращения 09.02.2016).

6. Павел Астахов: проблемы детей с ограниченными возможностями здоровья должны решаться системно [Электронный ресурс]. - М.: 2015. URL: http://www.rfdeti.ru/news/9730-pavel-astahov-problemy-detey-s-ogranichennymi-vozmozhnostyami-zdorovya-dolzhny-reshatsya-sistemno. (дата обращения 09.02.2016).

7. Хорошева Т. А. Информационное обеспечение оценки раннего развития детей с ограниченными возможностями на основе теста Штрасмайера [Текст] / Т. А. Хорошева // Наука и образование: современные тренды : коллективная монография. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 90–99.

DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED SOCIO-MEDICAL CARD OF THE CHILD FOR INFORMATIONAL SUPPORT FOR REHABILITATION PROCESS OF CHILDREN AND TEENAGERS WITH LIMITED HEALTH ABILITIES

T.A. Khorosheva, M.A. Novoseltseva

The paper describes process of infological modeling and realization of the "Socio-medical card of the child" database with graphic user interface for the process of socio-medical rehabilitation of children and teenagers with limited health abilities and disabled people. The database is designed for specialists of rehabilitation centers and provides informational support for individual programs of rehabilitation

Key words: database, rehabilitation center, graphic user interface, socio-medical card of the child, individual program of rehabilitation

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ВЫБОРУ ТАКТИКИ ЛЕЧЕНИЯ ХРОНИЧЕСКОЙ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ У БОЛЬНЫХ С ОПЕРИРОВАННЫМИ ПРИОБРЕТЕННЫМИ ПОРОКАМИ СЕРДЦА

А.С. Трухачев, Е.Н. Коровин

В статье рассмотрен процесс оценки обоснованности в плане выбора схемы лечения отобранных диагностических показателей ХСН на основе метода кластерного анализа

Ключевые слова: хроническая сердечная недостаточность (ХСН), классификация, метод главных компонент, лечение

Введение. В ходе ведения больных с ХСН на фоне оперированных приобретенных пороков сердца врач сталкивается с проблемой обработки больших объемов информации. В связи с этим актуальной является задача выделения и статистического обоснования отбора наиболее значимых показателей, на основании которых можно рационально выбирать тактику лечения.

Объект и методы исследования. Проанализируем адекватность разделения всей совокупности больных на группы по схемам лечения, основываясь на значениях исходных показателей. Будем использовать метод кластерного анализа и метод главных компонент.

Объектами для анализа послужили 120 больных XCH оперированных на фоне приобретенных пороков сердца. Исходя из значений 8 диагностических показателей ХСН: стандартное отклонение кардиоинтервалов (SDNN), квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар RR – интервалов (RMSSD), процент количества пар последовательных кардиоинтервалов в кардиограмме, отличающиеся более чем на 50 мс (PNN50), средневзвешенная ритмограммы (CBBP), вариация уровень альдостерона в крови (Альдостерон), показания теста 6-минутной ходьбы (6-ти мин. Тест), уровнь легочной гипертензии (ЛГ), фракция выброса (ФВ), играющих важную роль В развитии И прогрессировании ХСН, была назначена схема патогенетического лечения ХСН (1 - лечение не требуется, 2 – только ИАПФ, 3 – ИАПФ и спиронолактон). Задача состоит в том, чтобы проверить корректность назначения схем лечения на основе значений выбранных показателей.

Экспериментальная часть. Рассмотрим организацию наблюдаемых данных в виде наглядных структур. Для решения данной задачи будем использовать иерархические агломеративные методы (древовидная кластеризация). Результаты

иерархической классификации нагляднее всего представить в виде дендрограммы (рис. 1).



классификации

В результате успешного анализа методом объединения визуально были обнаружены 3 кластера. Проверим адекватность такого разделения данных с помощью метода К средних.

В общем случае метод К средних строит ровно К различных кластеров, расположенных на возможно больших расстояниях друг от друга[1,3].

Проанализируем дисперсию по табл. 1, в которой приведена межгрупповая и внутригрупповая дисперсии. Где строки переменные, столбцы - показатели для каждой переменной: дисперсия между кластерами (МД), свободы для межклассовой число степеней дисперсии (ССМД), дисперсия внутри кластеров (ВД), число степеней свободы для внутриклассовой дисперсии (ССВД), F - критерий, для проверки гипотезы о неравенстве дисперсий, уровень значимости р. Проверка данной гипотезы похожа на проверку гипотезы в дисперсионном анализе, когда межгрупповая дисперсия сравнивается с внутригрупповой дисперсией для принятия решения, являются ли средние для отдельных переменных в разных совокупностях значимо различными, т. е. делается предположение о том, что уровни фактора не влияют на результат.

Трухачев Антон Сергеевич – ВГТУ, аспирант, e-mail: ton.90@mail.ru

Коровин Евгений Николаевич – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: korovin@saums.vorstu.ru

Таблица 1

	МД	ССМД	ВД	ССВД	F	р
SDNN	58,4502	2	60,54975	117	56,4716	0,000000
PNN 50	108,5077	2	10,49234	117	604,9840	0,000000
RMSSD	55,2136	2	63,78640	117	50,6377	0,000000
CBBP	78,1288	2	40,87116	117	111,8279	0,000000
Альдостерон	35,9807	2	83,01929	117	25,3540	0,000000
6-ти мин тест	70,7165	2	48,28345	117	85,6799	0,000000
ЛГ	81,8088	2	37,19125	117	128,6811	0,000000
ФВ	100,2593	2	18,74075	117	312,9633	0,000000

Анализ дисперсии

Исходя из амплитуды (и уровней значимости) F-статистики, переменные PNN 50, ФВ и ЛГ являются главными при решении вопроса о распределении объектов по кластерам.

В ходе проведения анализа были выделены 3 различных кластера.

Рассмотрим график, показанный на рис. 2 (на оси абсцисс показаны классифицирующие показатели, на оси ординат - средние значения показателей в кластерах).



Рис. 2. Средние значения показателей в выделенных кластерах

Сопоставляя средние значения показателей в кластерах, видим, что кластеры имеют статистически значимые отличия друг от друга.

Итак, в первый кластер вошли 40 наблюдаемых пациентов, которых отличает наибольший уровень альдостерона в крови, легочной гипертензии и наименьшие значения показателей: SDNN, PNN 50, RMSSD, CBBP, 6-ти мин тест. Наиболее различающим признаком второго кластера, к которому отнесены 42 пациента, является наименьшее значение фракции выброса. Тогда как третий кластер включает в себя 38 пациентов, которых характеризуют наибольшие значения показателей: SDNN, PNN 50, RMSSD, СВВР. 6-ти мин тест, ФВ и наименьшие значения показателей: Альдостерон и ЛГ.

Вся совокупность пациентов разделилась на кластеры в строгом соответствии с назначенными схемами лечения: 1 кластер - ИАПФ и спиронолактон, 2 кластер - только ИАПФ, 3 кластер - лечение не требуется, следовательно, выбор показателей является обоснованным.

Далее перейдем к применению метода анализа главных компонент для формирования полной картины классификации данных. В ходе проведения анализа для набора переменных создается факторное пространство, затем направляющие полученного пространства интерпретируются. Целью данного анализа является изучение взаимосвязей между различными показателями, чтобы выявить скрытые факторы, различающие изучаемые группы пациентов, а так же сделали бы возможной визуализацию этих групп.

Собственные значения факторов представлены в табл. 2. В этой таблице для каждого собственного значения так же представлен процент объясненной дисперсии. Собственные значения отражают важность каждого фактора для объяснения общей дисперсии.

Гаолица 2								
Собственные значения								
Собственные значения	% объясненной дисперсии							
5,569385	69,61731							
0,751310	9,39138							
0,519116	6,48895							
0,423762	5,29703							
0,317303	3,96628							
0,220567	2,75709							
0,112230	1,40288							
0,086326	1,07908							
	Собствен Собственные значения 5,569385 0,751310 0,519116 0,423762 0,317303 0,220567 0,112230 0,086326							

Фактор, соответствующий максимальному значению (5,569385), описывает приблизительно 69,6% общей вариации. Второй фактор, для значения (0,751310) отвечает за 9,4 % общей вариации Когда анализируются И Т.Д. корреляционные матрицы, сумма собственных значений равна числу (активных) переменных, для которых выделены (рассчитаны) факторы, при этом "среднее ожидаемое" собственное значение равно 1. На практике применяется много критериев для выбора размерности факторного правильного пространства. Наиболее простой из них - оставить только те факторы, собственные значения которых больше 1. В данном примере, только первые собственное значение больше 1 и оно объясняет 69,6 % общей вариации.

Другой способ определения числа факторов построение и анализ, так называемого графика каменистой осыпи Кеттела (рис. 3). Этот график является линейным и на нем отображается последовательность собственных значений



Рис. 3. График каменистой осыпи

Кеттел предложил определить на этом графике собственное значение, начиная с которого "горка" теряет свою кривизну и выходит на примерно постоянный уровень.

Правая часть графика представляет собой лишь незначительные остатки "каменистую осыпь" [2].

Таким образом, нужно оставить не более чем число факторов, расположенных слева от осыпи.

Факторные координаты переменных представлены в виде табл. 3 координат исходных факторов в пространстве новых, выделенных факторов.

Факторные координаты переменных						
	Фактор 1	Фактор 2				
SDNN	0,744257	-0,133079				
PNN 50	0,930697	-0,193146				
RMSSD	0,816506	0,141120				
CBBP	0,869838	-0,080191				
Альдостерон	-0,760414	-0,568425				
6-ти мин тест	0,925968	0,250940				
ЛГ	-0,883447	0,060308				
ΦB	0,714033	-0,529372				

Таблица 3

Так как текущий анализ производится на основе корреляционной матрицы, выводимые результаты можно интерпретировать как корреляции соответствующих переменных с каждым фактором.

В данном случае, первая ось, соответствующая собственному значению 5,569385 сильно

коррелирует со всеми переменными. Вторая же ось наиболее сильно коррелирует с переменными Альдостерон и ФВ.

Рассмотрим график факторных координат переменных (рис. 4). График факторных координат часто сильно упрощает процесс интерпретации факторов.



Рис. 4. Проекция переменных на факторные оси

Заметим, что по умолчанию на этом графике будет показан единичный круг. Так как текущий анализ основан на корреляциях, максимальное значение факторной координаты не может превысить 1. Кроме того, квадраты всех факторных координат для всех переменных (т.е., квадраты корреляций между переменной и всеми факторами) не могут превысить значения 1. Таким образом, все факторные координаты должны попасть в единичный круг, выведенный на график. Чем ближе переменная к единичной окружности, тем лучше она воспроизведена в найденной системе координат.

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим полученные результаты на графике (рис. 5).



Рис. 5. Наблюдения в выделенном пространстве факторов

На этом графике заметен интересный результат кластеризации наблюдений. Выделенные классы наблюдений обладают отчетливыми различиями между группами в соответствии с выбранной схемой лечения. Таким образом, метод главных компонент полностью оправдывает себя в задачах классификации для выявления ключевых факторов набора переменных, нанесения на карту других осей интересующих выделенных переменных и выявления кластеров наблюдений с общими характеристиками по отношению к полученным направляющим. В ходе проведения анализа было установлено, что кластерного исследуемый показателей набор является статистически значимым и достаточным для адекватного выбора тактики лечения.

Литература

1. Кучеренко, В. З. Применение методов статистического анализа [Текст] : учеб. пособие / В.З. Кучеренко. – 4 изд., перераб. и доп. – М. : ГЭОТАР-Медиа, 2006. – 192 с.

2. Реброва, О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA [Текст] : учеб. пособие. / О. Ю. Реброва. – М. : МедиаСфера, 2002. – 312 с.

3. Электронный учебник по статистике

[Электронный ресурс] : Режим доступа :

http://www.statsoft.ru/home/textbook/ default.htm.

Воронежский государственный технический университет

STATISTICAL ANALYSIS OF CHOICE OF TACTICS OF TREATMENT OF CHRONIC HEART FAILURE IN PATIENTS WITH ACQUIRED DEFECTS OPERATED HEART

A.S. Trukhachev, E.N. Korovin

The article discloses the use of cluster analysis and principal component analysis to streamline the process of selecting the tactics pathogenetic treatment of patients with chronic heart failure (CHF) operated acquired heart defects

Key words: Chronic heart failure (CHF), classification, principal component analysis, treatment

Энергетика

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Э.Л. Топалов

В статье рассматривается термодинамический цикл аксиально-поршневого двигателя внутреннего сгорания, оснащенного турбо-наддувом, обладающего высокими показателями мощности и коэффициента полезного действия при отрицательно стабильном показателе расхода топлива

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, термодинамический цикл

В двигателе внутреннего сгорания (ДВС) использован ряд образцовых термодинамических циклов. Эти образцовые циклы называют идеальными. Но образцовые термодинамические циклы двигателей внутреннего сгорания, а также и цикл Карно являются частными случаями некоторого общего для них цикла, который назван универсальным термодинамическим циклом тепловых двигателей.

Такой цикл изображен на рис. 1 и образован адиабатой сжатия ас, политропой сг с показателем n_1 , по которой теплота q_1 подводится к рабочему телу; адиабатой расширения zb и политропой ba с показателем n_2 , по которой теплота q_2 отводится от рабочего тела.

Термический кпд этого цикла равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_2(T_b - T_a)}{c_1(T_z - T_c)},$$
 (1)

где c_1 и c_2 – соответственно теплоемкости политропных процессов cz и ba.

Обозначим:

 $\varepsilon = \frac{v_a}{v_c}$ – степень адиабатного сжатия; $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$ – степень изменения давления в процессе подвода теплоты;

 $\rho = \frac{v_z}{v_c}$ – степень изменения объема в про-

цессе подвода теплоты.

$$\frac{T_c}{T_a} = \left(\frac{v_a}{v_c}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \,. \tag{2}$$

Уравнение состояния применительно к точкам с и z имеет вид:

$$p_c v_c = RT_c$$
, $p_z v_z = RT_z$.

После почленного деления получим:





Рис. 1. Схема протекания цикла

Топалов Эдуард Львович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 252-34-52

В соответствии с рис. 1, б изменение энтропии в политропных процессах *cz* и *ba* одинаково, поэтому

$$\Delta s = c_1 \ln \frac{T_z}{T_c} = c_2 \ln \frac{T_b}{T_a}$$

откуда следует, что

$$\frac{T_b}{T_a} = \left(\frac{T_z}{T_c}\right)^{\frac{c_1}{c_2}} = (\lambda \rho)^{\frac{c_1}{c_2}}.$$
(4)

Подставив (2), (3), (4) в (1), после соответствующих преобразований получают:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{(\lambda \rho)^{\frac{\sigma_1}{c_2}} - 1}{\frac{c_1}{c_2} (\lambda \rho - 1)},$$
 (5)

при этом

$$c_1 = c_v + R \frac{\log \rho}{\log(\lambda \rho)}.$$
 (6)

Из (5) следует, что во всех случаях с увеличением ε значение η_t растет.

Некоторые частные случаи:

1. Если $c_1 = c_2$, то в соответствии с (5):

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}},\tag{7}$$

И так как при этом c_1 и c_2 могут иметь любые абсолютные значения, включая и случай, когда $c_1 = c_2 = \pm \infty$, то циклов, удовлетворяющих указанному условию, бесконечно много. Нетрудно выдать, что при $c_1 = c_2 = \pm \infty$ имеет место цикл Карно. При $c_1 = c_2 = c_v$ получим цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом и отводом теплоты, а при $c_1 = c_2 = c_p - цикл$ газотурбинной установки с изобарным подводом теплоты. При $c_1 = c_2 = \frac{c_v + c_p}{2}$ политропы *cz* и *ba* будут изображаться прямыми диниями, проходящими на диаграмме PV через начало координат.

2. Если $c_1 = c_p$ и $c_2 = c_v$, то $\lambda = 1$ и (5) примет вид:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)},$$
(8)

что соответствует циклу поршневого двигателя внутреннего сгорания с изобарным подводом и изохорным отводом теплоты.

3. При $c_1 = c_v$ и $c_2 = c_p$ имеет место $\rho = 1$ и поэтому уравнение (5) примет вид:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda - 1}, \qquad (9)$$

что соответствует циклу газотурбинной установки с изохорным подводом теплоты.

Рассмотренные частные случаи универсального термодинамического цикла являются наиболее типичными и далеко не исчерпывают всех его возможностей.

Путем комбинирования двух или более универсальных циклов, осуществляемых каждый при различных условиях подвода и отвода теплоты, можно получить более сложные циклы, например, известный цикл Тринклера (рис. 2). Последний можно представить, как совокупность цикла acz_1b_1a , осуществляемого при $c_1 = c_2 = c_v$, и цикла $b_1z_1zbb_1$, осуществляемого при $c_1 = c_v$ и $c_2 = c_v$. Термический кпд сложного (комбинированного) цикла, состоящего, например, из двух элементарных циклов, можно определить на основании следующего. Если полезная работа первого из соответствующих циклов:

$$l_1=q_1'\eta_{t1}$$
 ,

а второго:

$$l_2 = q_1'' \eta_{t2}$$
 ,

то для комбинированного цикла в целом можно написать:

$$\begin{split} \eta_t &= \frac{l_1 + l_2}{q_1' + q_1'''} = \frac{l_1 + l_2}{q_1} = \frac{q_1' \eta_{t1} + q_1'' \eta_{t2}}{q_1}. \\ \text{Если обозначить} \frac{q_1^i}{q_1} &= \xi_i, \text{то получим:} \\ \eta_t &= \xi_1 \eta_{t1} + \xi_2 \eta_{t2} \,. \end{split}$$

В общем случае, когда комбинированный цикл состоит из *m* элементарных циклов, его кпд можно определить по формуле:

$$\eta_t = \sum_{i=1}^{l=m} \xi_i \eta_{ti} \,. \tag{10}$$

В частности, для цикла на рисунок 2, в соответствии с (10) имеет место:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1)}$$



Рис. 2. Схема цикла Тринклера

Эффективность универсального термодинамического цикла и других производных от него, существенно зависит не только от условий подвода и отвода теплоты, но и от количества теплоты q_1 , подводимой к единице количества рабочего тела.

Если выразить:

$$q_1 = c_1(T_z - T_c) = c_1 T_a \varepsilon^{k-1} \lambda(\rho - 1) ,$$

$$q_2 = c_2(T_b - T_a) = c_2 T_a \left[(\lambda \rho)^{\frac{c_1}{c_2}} - 1 \right] .$$

Решая эти уравнения совместно и исключая при этом $\lambda \rho$, получим:

$$q_2 = c_2 T_a \left[\left(1 + \frac{q_1}{c_1 T_a \varepsilon^{k-1}} \right)^{\frac{c_1}{c_2}} - 1 \right].$$
(11)

Сохраняя в (1) q_1 и заменив q_2 по (11), найдем:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_2 T_a}{\varepsilon^{k-1}} \left[\left(1 + \frac{q_1}{c_1 T_a \varepsilon^{k-1}} \right)^{\frac{c_1}{c_2}} - 1 \right].$$
(12)

Очевидно, что η_t универсального термодинамического цикла зависит от степени адиабатного сжатия (ε), условий подвода и отвода теплоты ($c_1, \frac{c_1}{c_2}$), тепловой нагрузки (q_1) и от начальной температуры рабочего тела T_a .

В реальных двигателях внутреннего сгорания тепловая нагрузка цикла зависит от коэффициента избытка воздуха α , при котором осуществляется реакция сгорания топлива. Если обозначить теплотворность топлива через H_{μ} кДж/кг и теоретически необходимое количество воздуха для полного сгорания топлива через L_{ρ} кг/кг, то

$$q_1 = \frac{H_{\rm H}}{\alpha L_0} = \frac{H_g}{\alpha} , \left[\frac{\kappa \Delta m}{\kappa \Gamma}\right]$$

где $H_g = \frac{H_{\mu}}{L_o}$ – теплотворность топливовоздушной смеси.

Таким образом, формула (12) представляется в следующем виде:

$$\eta_{t} = 1 - \frac{c_{2}\alpha T_{a}}{H_{g}} \left[\left(1 + \frac{H_{g}}{c_{1}\alpha T_{a}\alpha\varepsilon^{k-1}} \right)^{\frac{c_{1}}{c_{2}}} - 1 \right].$$
(13)

В таком виде формула для η_t позволяет проследить универсальный термодинамический цикл, как прототип реального процесса, протекающего в различных двигателях внутреннего сгорания.

На рис. З показана зависимость η_t от α при различных значениях $\frac{c_1}{c_2}$ для случая, когда K = 1,4; $\varepsilon = 10$; $c_2=0,72$ кДж/кг· °С; $T_a = 300$ К и $H_g = 3000$ кДж/кг.

Автором исследования [1] по уравнению (13) показано, что изменение T_a влияет на η_t в том же направлении, что и изменение α , и что η_t практически не зависит от H_g , если иметь в виду обычное топливо и окислитель – воздух.



Рис. 3. Зависимость термодинамического кпд от условий подвода и отвода тепла и тепловой нагрузки цикла

На современной стадии развития двигателестроения большое внимание уделяется конструированию турбопоршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Поэтому исследования в области теории их рабочего процесса приобретают большую значимость.

Определенный интерес представляют в этом отношении, в частности, также термодинамические исследования цикла турбопоршневых ДВС, так как они позволяют наметить главные, определяющие пути совершенствования рабочего процесса, которые при определенных условиях могут быть успешно реализованы.

Известные в этом направлении работы имеют определенные достоинства. В то же время им свойственна некоторая незавершенность и абстрактность. Имеется в виду, в частности, отсутствие в этих работах удачных попыток установить возможно более тесную связь термодинамических циклов турбопоршневых ДВС с реально протекающими в них процессами.

При рассмотрении схемы термодинамического цикла аксиально-поршневого ДВС в общем виде предполагается, что по началу адиабатного процесса сжатия (рис. 4, точка 3) и концу адиабатного расширения (точка 7) в поршневой части ДВС соответствует одно и то же положение поршня.



Рис. 4. Схема протекания термодинамического цикла аксиально-поршневого ДВС

Рабочий процесс протекает следующим образом. Рабочее тело адиабатно сжимается в нагнетателе (линия 1-2), после чего поступает в холодильник, где от него изобарно отводится некоторое количество тепла q'_2 (линия 2-3). Охлажденное до температуры T_3 рабочее тело затем поступает в цилиндр поршневой части ДВС и адиабатно сжимается до состояния 4 (линия 3-4), после чего к нему подводится с некоторым опережением по политропе 4-5 первая часть тепла в количестве q_1'' подводится изобарно (линия 5-6). После адиабатного расширения в поршневой части ДВС (линия 6-7) от рабочего тела изохорно отводится тепло q_1'' так, что $q_1''' = q_2''$ (линия 8-9). В сопловом аппарате и на лопатках турбины происходит адиабатное расширение рабочего тела (линия 9-10).

Цикл замыкается условным изобарным процессом 10-1 с отводом тепла q_2''' .

В установках с импульсной газовой турбиной рабочее тело после адиабатного расширения в поршневой части ДВС (линия 6-7) продолжает непосредственно расширяться в газовой турбине (линия 7-11), а условному изобарному процессу, замыкающему цикл, соответствует линия 11-1:

 $\sigma = \frac{P_2}{P_1}$ - степень повышение давления в нагнетателе;

 $\lambda = \frac{P_3}{P_4}$ - степень повышение давления в поршневом ДВС;

 $\pi = \frac{P_9}{P_{10}}$ - перепад давлений в газовой турбине постоянного давления;

 $\varepsilon_{\alpha} = \frac{V_3}{V_4}$ - степень адиабатного сжатия в поршневом ДВС;

 $\varepsilon = \frac{V_3}{V_5}$ - полная (геометрическая)степень

сжатия в поршневом ДВС; $\varphi = \frac{V_5}{V_4}$ - степень уменьшения объема в поршневом ДВС при политропном подводе

тепла; $\rho = \frac{V_6}{V_5}$ - степень увеличения объема в поршневом ДВС при изобарном подводе тепла;

 $\tau = \frac{T_2}{T_1}$ - степень промежуточного охлаждения в холодильнике;

 $\beta = \frac{T_{10}}{T_{11}}$ - соотношение температур в конце адиабатного расширения в турбине постоянно-

го давления и в импульсной турбине. Согласно принятым обозначениям.

$$\varepsilon_{\alpha} = \varphi \varepsilon$$
. (14)

Используя известные термодинамические соотношения, получают следующие формулы для определения параметров рабочего тела в характерных точках цикла.

1. Лавление:

$$\begin{split} P_{1} - \text{заданное значение ;} \\ P_{2} &= \sigma P_{1} ; \\ P_{3} &= P_{2} ; \\ P_{4} &= \varepsilon_{a}^{k} P_{3} = \sigma \varepsilon_{a}^{k} P_{1} = \sigma (\varphi \varepsilon)^{k} P_{1} ; \\ P_{5} &= \lambda P_{4} = \lambda \sigma \varepsilon_{a}^{k} P_{1} = \lambda \sigma (\varphi \varepsilon)^{k} P_{1} ; \\ P_{5} &= \lambda P_{4} = \lambda \sigma \varepsilon_{a}^{k} P_{1} = \lambda \sigma (\varphi \varepsilon)^{k} P_{1} ; \\ P_{5} &= \rho_{5} ; \\ P_{7} &= \sigma \lambda (\varphi \rho)^{k} P_{1} ; \\ P_{8} &= \pi P_{1} ; \\ P_{9} &= P_{8} ; \\ P_{10} &= P_{1} . \end{split}$$
2. Температура:

$$T_{1} - \text{задано} ; \\ T_{2} &= \sigma \frac{\frac{k-1}{k}}{\tau} T_{1} ; \\ T_{3} &= \frac{\sigma \frac{k-1}{k}}{\tau} T_{1} ; \\ T_{4} &= \frac{\sigma \frac{k-1}{k}}{\tau} \varepsilon_{a}^{k-1} T_{1} = \frac{\sigma \frac{k-1}{k}}{\tau} (\varphi \varepsilon)^{k-1} T_{1} ; \\ T_{5} &= \lambda \frac{\sigma \frac{k-1}{k}}{\tau} \varphi \varepsilon_{a}^{k-1} T_{1} = \lambda \frac{\sigma \frac{k-1}{k}}{\tau} \varphi^{k} \varepsilon^{k-1} T_{1} ; \\ T_{6} &= \lambda \frac{\sigma \frac{k-1}{k}}{\tau} \varphi \rho \varepsilon_{a}^{k-1} T_{1} = \lambda \frac{\sigma \frac{k-1}{k}}{\tau} \varphi^{k} \rho \varepsilon^{k-1} T_{1} ; \\ T_{7} &= \lambda (\varphi \rho)^{k} \frac{\sigma \frac{k-1}{\tau}}{\tau} T_{1} ; \\ T_{8} &= \frac{\pi}{\tau \sigma \frac{1}{k}} T_{1} ; \\ \end{split}$$

$$T_{9} = \frac{(k-1)\pi + \lambda(\varphi\rho)^{k}\sigma}{k\tau\sigma^{\frac{1}{k}}}T_{1};$$

$$T_{10} = \frac{(k-1)\pi + \lambda(\varphi\rho)^{k}\sigma}{k\tau\sigma^{\frac{1}{k}}\pi^{\frac{k-1}{k}}}T_{1} = \beta T_{11};$$

$$T_{11} = \frac{\lambda^{\frac{1}{k}}\varphi\rho}{\tau}T_{1}.$$

Здесь $k = \frac{c_{\rho}}{c_{v}}$ – отношение изобарной теплоемкости к изохорной. Теплоемкость политропного процесса 4-5 может быть определена по формуле:

$$c = c_v \frac{\log(\lambda \varphi^k)}{\log(\lambda \varphi)}.$$
 (15)

Термический кпд цикла равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2' + q_2''}{q_1' + q_1''}$$

Так как при этом $q_1 = q'_1 + q''_1 = c(T_5 - T_4) + c_p(T_6 - T_5);$ $q_2 = q'_2 + q'''_2 = c_p(T_2 - T_3) + c_p(T_{10} - T_{11}),$ то можно написать:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_p(T_2 - T_3) + c_p(T_{10} - T_{11})}{c(T_5 - T_4) + c_p(T_6 - T_5)}$$

После подстановки значений температур и соответствующих преобразований окончательно получим:

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{(\varphi\varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\tau\left(1 - \frac{1}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}}\right) + \frac{(k-1)\pi + \lambda(\varphi\rho)^k\sigma}{k\sigma\pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1}{\frac{\log(\lambda\varphi^k)}{\log(\lambda\varphi)} \cdot (\lambda\varphi - 1) + k\lambda\varphi(\rho - 1)}$$
(16)

или

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{(\varphi \varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\tau \left(1 - \frac{1}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}}\right) + \frac{\beta \lambda \bar{k} \varphi \rho}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}} - 1}{\frac{\log(\lambda \varphi^k)}{\log(\lambda \varphi)} \cdot (\lambda \varphi - 1) + k\lambda \varphi(\rho - 1)}.$$
(17)

При изотермическом сжатии рабочего тела в нагнетателе надобность в промежуточном охлаждении последнего отпадает, то есть в этом случае $q'_2 = 0$, а, следовательно, имеет место

$$\tau\left(1-\frac{1}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}}\right)=0.$$

Таким образом, расчетные формулы для η_t аксиально-поршневых ДВС с газовой турбиной постоянного давления и импульсной газовой турбиной соответственно будут иметь вид:

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{(\varphi \varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\frac{(k-1)\pi + \lambda(\varphi \rho)^k \sigma}{k \sigma \pi^{\frac{k-1}{k}}} - 1}{\frac{\log(\lambda \varphi^k)}{\log(\lambda \varphi)} \cdot (\lambda \varphi - 1) + k \lambda \varphi(\rho - 1)}.$$
 (18)

Частные случаи протекания термодинамического цикла аксиально-поршневого ДВС представлены на рис. 5.



Рис. 5. Частные случаи протекания термодинамического цикла аксиально-поршневого ДВС



Рис. 5. Частные случаи протекания термодинамического цикла аксиально-поршневого ДВС (продолжение)



Рис. 5. Частные случаи протекания термодинамического цикла аксиально-поршневого ДВС (окончание)

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{(\varphi \varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\frac{\lambda^{\frac{1}{k}} \varphi \rho}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}} - 1}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}}{\frac{\log(\lambda \varphi^k)}{\log(\lambda \varphi)}} \cdot (\lambda \varphi - 1) + k\lambda \varphi(\rho - 1)}.$$
 (19)

Важнейшие частные случаи:

1. При $c = c_v$, следовательно, при $\varphi = 1$ и $\varepsilon_{\alpha} = \varepsilon$ в соответствии с формулой (16) будем иметь (рис. 5, а):

$$\eta_{t} = 1 - \frac{k}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\tau \left(1 - \frac{1}{\frac{k-1}{\sigma k}}\right) + \frac{(k-1)\pi + \lambda(\rho)^{k}\sigma}{\frac{k-1}{\sigma k}} - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)},$$
(20)

что соответствует циклу турбопоршневого ДВС с изохорным подводом тепла по линии 4-5.

2. Когда дополнительно к вышеуказанному условию отсутствует промежуточное охлаждение рабочего тела и, следовательно, $\tau = 1$, получим (рис. 5, б):

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\frac{(k-1)\pi + \lambda(\rho)^k \sigma}{k-1} - \frac{1}{\sigma^{k-1}_{k-1}}}{(\lambda-1) + k\lambda(\rho-1)},$$
(21)

3. При $\varphi = 1$ и $\pi = \sigma$ в соответствии с формулой (16) будем иметь (рис. 5, в):

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{k\tau \left(\sigma^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) - \sigma^{\frac{k-1}{k}} + \lambda \rho^k}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)},$$
(22)

4. При $\varphi = 1$, $\tau = 1$ и $\pi = \sigma$ (рис. 5, г) формула (16) примет вид:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{\sigma^{\frac{k-1}{k}} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]},$$
(23)

5. Когда $\tau = 1$ и $\varphi = \sigma = 1$ (рис. 5, д) исследуемый цикл превратится в цикл поршневого ДВС с опережающем подводом тепла и согласно формуле (16) будем иметь:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{(\varphi \varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\lambda(\varphi \rho)^k - 1}{\frac{\log(\lambda \varphi^k)}{\log(\lambda \varphi)} \cdot (\lambda \varphi - 1) + k\lambda \varphi(\rho - 1)},$$
(24)

6. Если, кроме того, $\varphi = 1$ (рис. 5, е), то исследуемый цикл превратится в классический цикл поршневого ДВС со смешанным подводом тепла (цикл Тринклера), причем:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)},$$
(25)

7. Если $\beta = 1$, то есть, когда адиабатное расширение рабочего тела после поршневого ДВС непосредственно продолжается в импульсной газовой турбине (рис. 5, ж), то согласно формуле (17) будем иметь:

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{(\varphi\varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\tau\left(1 - \frac{1}{\sigma\frac{k-1}{k}}\right) + \frac{\lambda \bar{k}\varphi\rho}{\sigma\frac{k-1}{k}} - 1}{\frac{\log(\lambda\varphi^k)}{\log(\lambda\varphi)} \cdot (\lambda\varphi - 1) + k\lambda\varphi(\rho - 1)},$$
(26)

8. Если, кроме того, $\varphi = 1$ (рис. 5, 3), то

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\tau\left(1 - \frac{1}{k-1}\right) + \frac{\lambda \bar{k}\rho}{\varepsilon} - 1}{\sigma k}}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)},$$
(27)

9. Если в турбопоршневом ДВС с импульсной турбиной отсутствует промежуточное охлаждение рабочего тела, т.е. $\tau = 1$ (рис. 5, и) и, кроме того, $\varphi = 1$, то согласно формуле (4) будем иметь:

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} \rho - 1}{\sigma^{\frac{k-1}{k}} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]},$$
(28)

При изотермическом сжатии в нагнетателе для этого случая:

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} \rho - \sigma^{\frac{k-1}{k}}}{\sigma^{\frac{k-1}{k}} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]},$$
(29)

При осуществлении рабочего процесса в реальных ДВС соотношение между параметрами λ и ρ зависит от количества тепла q_1 , подводимого к рабочему телу.

Можно показать, что между этими величинами в самом общем случае существует следующая связь:

$$q_1 = \frac{\sigma^{\frac{k-1}{k}}}{\tau} (\varphi \varepsilon)^{k-1} \left[\frac{\log(\lambda \varphi^k)}{\log(\lambda \varphi)} \cdot (\lambda \varphi - 1) + k\lambda \varphi(\rho - 1) \right] c_v T_1 , \quad (30)$$

Найдя из этого выражения значение ρ и исключив его таким образом из формул (16) и (17), после соответствующих преобразований получим:

$$\begin{split} \eta_t &= 1 - \frac{c_p T_1}{q_1} \left[\frac{\tau - 1}{\tau} \sigma^{\frac{k-1}{k}} + \frac{k - 1}{k\tau} \cdot \frac{\pi^{\frac{1}{k}}}{\sigma^{\frac{1}{k}}} + \frac{\lambda \varphi^k}{k\tau} \times \right. \\ &\times \frac{\sigma^{\frac{k-1}{k}}}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \left\{ 1 + \frac{1}{k\lambda\varphi} \left(\frac{q_1}{c_v T_1(\varphi\varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\tau}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\log(\lambda\varphi^k)}{\log(\lambda\varphi)} (\lambda\varphi - 1) \right) \right\}^k \qquad (31) \\ &\qquad - 1 \right], \end{split}$$

или

$$\eta_{t} = 1 - \frac{c_{p}T_{1}}{q_{1}} \left[\frac{\tau - 1}{\tau} \sigma^{\frac{k-1}{k}} + \frac{\beta \lambda^{\frac{1}{k}} \varphi}{\tau} \right]$$

$$+ \frac{1}{k\lambda\varphi} \left(\frac{q_{1}}{c_{v}T_{1}(\varphi\varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\tau}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\log(\lambda\varphi^{k})}{\log(\lambda\varphi)} \cdot (\lambda\varphi - 1) \right) - 1 \right].$$
(32)

Для реальных ДВС имеет место:
$$q_{1} = \frac{H_{\mu}}{\alpha L_{0}} = \frac{H_{\partial}}{\alpha},$$

где $H_{\rm u}$ – теплотворность топлива, кДж/кг; L_0 – теоретически необходимое количе-

ство воздуха, кг/кг;

 α — коэффициент избытка воздуха, при котором осуществляется сгорание топлива;

 H_{∂} - теплотворность рабочей смеси.

Если учесть, кроме того, что

$$c_v = \frac{8,315}{k-1}$$

где 8,315 – универсальная газовая постоянная, кДж/кг·град, то формулы (31) и (32) можно привести к следующему виду:

$$\eta_{t} = 1 - 8.315 \frac{k}{k-1} \frac{\alpha T_{1}}{H_{0}} \left[\frac{\tau - 1}{\tau} \sigma^{\frac{k-1}{k}} + \frac{k - 1}{k\tau} \cdot \frac{\pi^{\frac{1}{k}}}{\sigma^{\frac{1}{k}}} + \frac{\lambda \varphi^{k}}{k\tau} \times \frac{\sigma^{\frac{k-1}{k}}}{\frac{k-1}{\pi^{\frac{k}{k}}}} \left\{ 1 + \frac{1}{k\lambda\varphi} \left(\frac{(k-1)H_{0}}{8.315\alpha T_{1}(\varphi\varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\tau}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\log(\lambda\varphi^{k})}{\log(\lambda\varphi)} (\lambda\varphi - 1) \right) \right\}^{k} - 1 \right],$$

$$(33)$$

ИЛИ

$$\eta_{t} = 1 - 8.315 \frac{k}{k-1} \frac{\alpha T_{1}}{H_{\partial}} \bigg| \frac{\tau - 1}{\tau} \sigma^{\frac{k-1}{k}} + \frac{\beta \lambda \bar{k} \varphi}{\tau} \bigg\{ 1 + \frac{1}{k\lambda\varphi} \bigg(\frac{(k-1)H_{\partial}}{8.315\alpha T_{1}(\varphi\varepsilon)^{k-1}} \cdot \frac{\tau}{\sigma^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{\log(\lambda\varphi^{k})}{\log(\lambda\varphi)} \cdot (\lambda\varphi - 1) \bigg) \bigg\} - 1 \bigg].$$
(34)

Введение в формулы для η_t величин α , T_1 , H_∂ , а равно и φ позволяет установить более непосредственную связь между термодинамическими циклами ДВС и реально протекающими в них процессами.

Формулами (31) и (33) следует пользоваться при исследовании цикла турбопоршневых ДВС с газовой турбиной постоянного давления, а формулами (32) и (34) – при исследовании цикла аксиально-поршневых ДВС с импульсной газовой турбиной, пологая при этом $\beta = 1$.

В соответствии с изложенным ниже приводятся некоторые выводы, позволяющие определить основные направления в части повышения аксиально-поршневых ДВС:

1. Из формул (16) и (17) видно, что термический кпд обобщенного термодинамического цикла турбопоршневого ДВС будет тем больше, при прочих равных условиях, чем больше полная (геометрическая) степень сжатия в поршневом ДВС – ε и чем меньше степень промежуточного охлаждения – τ .

2. Чтобы сравнить циклы газотурбинного ДВС с импульсной газовой турбиной, с одной стороны, и с газовой турбиной постоянного давления рассмотрим изображение хвостовой части цикла в координатах *TS* (рис. 6).



Рис. 6. К сравнению циклов газотурбинных ДВС с импульсной газовой турбиной и газовой турбиной постоянного давления

Во втором случае она изображается ломаной линией 7-8-9-10 и тепло q_2'' , изохорно отводимое от рабочего тела, будет эквивалентно площади 7-8-8'-7'-7, а тепло q_1''' изобарно подводимое к рабочему телу перед турбиной, будет эквивалентно площади 8-9-9'-8'-8. И так как по условию $q_1''' = q_2''$, то пл. 7-8-8'-7'-7 = пл. 8-9-9'-8'-8. Это значит, что точка 9 лежит правее адиабаты расширения 7-11 для ДВС с импульсной турбиной. Таким образом, точка 11 на изобаре $P_{10} = P_1 = const$ оказывается ниже точки 10. Отсюда следует, что для ДВС с импульсной газовой турбиной имеет место:

$$\beta = \frac{I_{10}}{T_{11}} > 1 \,.$$

Имея это в виду и обращаясь к формуле (17), можем сделать вывод о том, что при равных условиях термический КПД турбопорш-

невого ДВС и с импульсной газовой турбиной будет больше такового для ДВС с газовой турбиной постоянного давления.

3. По графику на рис. 7, построенному для случая, когда $\tau = 1$, $\sigma = 2$, $\frac{\pi}{\sigma} = 1$, $\alpha = 1,4$, T = 300 К, $H_0 = 90000$ КДж/кг, k = 1,4, видно, что η_t растет как с увеличением ε , так и с увеличением λ .



Рис. 7. Зависимость $\eta_t = (\varepsilon, \lambda)$

4. Весьма существенное влияние на η_t оказывают степень повышения давления в нагнетателе - σ и соотношение перепадов давлений в газовой турбине и нагнетателе - $\frac{\pi}{\sigma}$ (рис. 8). Как видно, с термодинамических позиций выгодно добиваться такого течения рабочего процесса, чтобы отношение $\frac{\pi}{\sigma}$ было возможно больше. Однако при этом возникнут определенные трудности с осуществлением продувки цилиндров поршневого ДВС от остаточных газов.



Рис. 8. Зависимость $\eta_t = (\sigma, \frac{\pi}{\sigma})$ Совершенно очевидно, что для увеличения отношения $\frac{\pi}{\sigma}$, а, следовательно, и увеличения η_t необходимо газообменный тракт аксиально-поршневого ДВС проектировать и изготовлять с точки зрения его динамических качеств на самом высоком уровне.

5. Ранее уже отмечалось, что применение промежуточного охлаждения снижает η_t . Как видно по рис. 9, влияние промежуточного охлаждения на η_t тем больше, чем больше степень повышения давления σ в нагнетателе и чем больше степень промежуточного охлаждения τ .



Рис. 9. Зависимость $\eta_t = (\sigma, \tau)$

Совокупное влияйте на термический КПД величин τ и $\frac{\pi}{\sigma}$ показано рис. 10, и что подтверждает необходимость улучшения аэродинамических качеств газообменного тракта аксиально-поршневых ДВС.



Рис. 10. Зависимость $\eta_t = \left(\frac{\pi}{\sigma}, \tau\right)$

6. При высоких степенях наддува, т. е. при больших значениях σ и отсутствии промежуточного охлаждения рабочего тела, положительный эффект за счет повышения удельной мощности существенно снижается, в

то время как тепловая напряженность ДВС значительно возрастает. Вместе с этим применение промежуточного охлаждения приводит к уменьшению η_t . Это противоречие можно изменить, применяя изотермическое сжатие рабочего тела в нагнетателе. Но изотермическое сжатие рабочего тела в нагнетателе можно осуществить далеко не всегда. Поэтому определенный интерес представляет охлаждение рабочего тела до нагнетателя.



Рис. 11. Влияние способа охлаждения на термический кпд турбопоршневого двс с газовой турбиной постоянного давления

На рис.11 показано изменение η_t для трех случаев (аксиально-поршневого ДВС с турбиной постоянного давления): когда охлаждение отсутствует; когда осуществляется полное промежуточное охлаждение $T_3 = T_1$ и когда рабочее тело охлаждается до нагнетателя, так, чтобы его температура после адиабатного сжатия в нагнетателе равнялось T_1 . Это имеет место в случае, когда температура рабочего тела перед вводом в нагнетатель снижается в $\sigma^{\frac{k-1}{k}}$ раз.

Как видим, охлаждение рабочего тела до его ввода в нагнетатель ДВС с турбиной постоянного давления не только желательно, но и тем эффективнее, чем больше σ .

Практически охлаждение рабочего тела до нагнетателя можно осуществить, например, посредством включения в схему установки холодильной машины, а также за счет применения испарительного охлаждения посредством впрыска в приемный патрубок нагнетателя воды или части цикловой воды топлива в сильно распыленном состоянии. Что касается турбопоршневого ДВС с импульсной газовой турбиной, то, как видно по рис. 12, охлаждение рабочего тела перед вводом в нагнетатель приводит во всем диапазоне значений σ к существенному уменьшению η_t .



Рис. 12. Влияние способа охлаждения воздуха на термический кпд турбопоршневого двс с импульсной газовой турбиной

7. По рис. 13 видно, что влияние коэффициента избытка воздуха α на η_t в пределах обычных значений α несущественно и тем менее заметно, чем больше σ .



Рис. 13. Зависимость $\eta_t = (\sigma, \alpha)$

8. Исследование формул (33) и (34) показывает, что η_t растет с увеличением начальной температуры цикла T_1 и уменьшением теплотворности рабочей смеси H_{∂} . Но так как влияние T_1 и H_{∂} на η_t весьма незначительно, тогда как среднее теоретическое давление цикла с увеличением T_1 и уменьшением H_{∂} заметно снижается, то, очевидно, воздействие на η_t за счет T_1 и H_{∂} практически нецелесообразно. 9. Выше было показано, что при равных условиях термический КПД турбопоршневых ДВС с импульсной газовой турбиной больше такового для установок с газовой турбиной постоянного давления. Из рис. 14 видно, что разница в значении η_t при этом составляет 4-9%, причем в области умеренных значений σ она более ощутима.



Рис. 14. Зависимость $\eta_t = (\sigma, \tau)$ для газотурбинных двс с импульсной газовой турбиной и газовой турбиной постоянного давления

10. Исследование обобщенного термодинамического цикла турбопоршневых ДВС показывает, что функция $\eta_t = f(\sigma)$ не имеет максимума. Однако этот максимум может иметь место в действительности, если при выводе аналитических зависимостей для КПД установки учитывать значение собственных КПД нагнетателя и газовой турбины.

Литература

1. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей [Текст]/ А.С. Орлин; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. -М.: Машиностроение, 1984.-384 с.

2. Пат. 2313675 Российская Федерация, МКП⁷ G01R 21/66. Аксиально-поршневой двигатель [Текст] / Топалов Э.Л., Куриленко Н.И.; заявитель и патентообладатель Тюменский архитектурно-строительный университет. - №2006102349/31; заявл. 25.06.2004; опубл. 27.12.2007, Бюл.№36. -7с.

3. Володин А.И. Локомотивные двигатели внугреннего сгорания [Текст]/ А.И. Володин. -М.: Транспорт, 1990. – 256 с.

Воронежский государственный технический университет UNIVERSAL THERMODYNAMICS CYCLE AXIAL-PISTON MOTOR E.L. Topalov

The article discusses the thermodynamic cycle of the axial-piston combustion engine, equipped with turbo-supercharged engines with high power and efficiency stable with a negative fuel consumption

Key words: axial-piston motor, thermodynamics cycle

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ДЕМОДУЛЯТОРА «В ЦЕЛОМ» КОДИРОВАННЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

А.Н. Глушков, В.П. Литвиненко, А.А. Шафоростова

Рассматривается возможность аппаратной реализации цифрового демодулятора «в целом» кодированных фазоманипулированных сигналов на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС)

Ключевые слова: фазовая манипуляция, цифровая демодуляция, помехоустойчивое кодирование, ПЛИС, VHDL

Двоичные сигналы с фазовой (ФМ) и относительной фазовой (ОФМ) манипуляцией находят широкое применение в системах передачи дискретной информации с некогерентной обработкой. Кодирование позволяет повысить помехоустойчивость приема сообщений. Эффективность приема повышается при обработке кодовой комбинации «в целом» [1], при этом объединяются операции демодуляции и декодирования в общую процедуру формирования отклика на каждую допустимую кодовую комбинацию. Решение принимается по максимальному значению отклика.

Известные алгоритмы демодуляции «в целом» требуют больших затрат, и актуальной является разработка быстрых цифровых алгоритмов демодуляции «в целом» на основе базового алгоритма [2], аппаратная реализация демодулятора описана в [3].

Входной радиосигнал *j*-го элемента *m*-й кодовой комбинации с двоичной ФМ имеет вид

$$s_{mi}(t) = S \cos(2\pi f_0 t + \psi + a_{mi} \cdot \pi / 2),$$
 (1)

где *S* - амплитуда, ψ - начальная фаза, f_0 - несущая частота, $a_{mj} = \pm 1$ - двоичный информационный символ, $j = \overline{0, (n-1)}$, *n* - число двоичных элементов кода. Для сигнала с ОФМ информационный символ ± 1 определяется разностью фаз 0 или π принимаемого (*j*-го) и предшествующего (*j*-1)-го элементов.

Структурная схема ¹некогерентного демодулятора «в целом» кодированных ФМ сигналов [2, 3] показана на рис. 1. Входной сигнал (1) поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), квантующий его с частотой $f_{KB} = 4f_0$ (по четыре отсчета s_{i0} , s_{i1} , s_{i2} , s_{i3} на *i*-м периоде несущей [2]). Они запоминаются в многоразрядном регистре сдвига на 4 отсчета (МР4) и в вычитателях ВЫЧ₀ и ВЫЧ₁ формируются два квадратурных отсчета вида

$$x_{i0} = s_{i0} - s_{i2}, \quad x_{i1} = s_{i1} - s_{i3}.$$
 (2)



Значения x_{i0} , и x_{i1} поступают в каналы квадратурной обработки ККО₀ и ККО₁, структурные схемы которых показаны на рис. 2, в которых реализуется быстрый алгоритм [2] вычисления величин

$$y_{i0} = \sum_{k=0}^{N-1} x_{(i-k)0} = \sum_{i=0}^{N-1} \left(s_{(i-k)0} - s_{(i-k)2} \right), \quad (3)$$

$$y_{i1} = \sum_{k=0}^{N-1} x_{(i-k)1} = \sum_{i=0}^{N-1} \left(s_{(i-k)1} - s_{(i-k)3} \right), \quad (4)$$

N - число периодов несущей $T_0 = 1/f_0$ в двоичном элементе кода.



Значения x_{i0} поступают на вход сумматора СУМ₀₁ ККО₀, в котором складываются с предше-

Глушков Алексей Николаевич – Воронежский институт МВД РФ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 242-14-41 Литвиненко Владимир Петрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 271-44-57

Шафоростова Анна Алексеевна – ВГТУ, студент, тел. 8-950-776-18-62

ствующим значением $x_{(i-1)0}$, записанным ранее в многоразрядный регистр сдвига на одну ячейку MP_{01} , после чего в регистр записывается x_{i0} . Аналогично сумма $x_{i0} + x_{(i-1)0}$ складывается с ранее записанным в регистр MP_{02} сдвига на две ячейки значением $x_{(i-2)0} + x_{(i-3)0}$, после чего данные в регистре сдвигаются. Далее процесс быстрых вычислений производится аналогично и на выходе n-го каскада появляется сумма (3),

$$n = \log_2 N . \tag{5}$$

Аналогично вычисляется сумма (4) в ККО₁.

Значения y_{i0} , y_{i1} поступают на вычислительные устройства ВУ_{m0} и ВУ_{m1} откликов квадратурных каналов u_{0m} и u_{1m} на m-ю кодовую последовательность длиной K элементов, $m = \overline{1, M}$, M-их число, в которых реализуется алгоритм вычисления величин

$$u_{0m} = \sum_{k=0}^{K-1} a_{mk} y_{0k} , \qquad (6)$$

$$u_{1m} = \sum_{k=0}^{K-1} a_{mk} y_{1k} , \qquad (7)$$

 $a_{mk} = \pm 1$ – элементы *m*-го кодового слова. В результате преобразования

$$z_m = \sqrt{u_{0m}^2 + u_{1m}^2}$$
 (8)

формируются отклики демодулятора на каждую разрешенную кодовую комбинацию, по наибольшему из которых в устройстве выбора максимума (УВМ) принимается решение о принятом кодовом слове.

Для аппаратной реализации алгоритма [3] использовался язык описания аппаратуры интегральных схем – VHDL [4]. На языке VHDL разработана параметризированная RTL-модель демодулятора «в целом». Дополнительно в модели учитывается, что операции вычисления величин u_{0m} (5) и u_{1m} (6) не являются быстрыми, поэтому их расчет можно выполнять только в моменты поступления синхроим-пульсов СИ цикловой синхронизации через интервалы времени *KNT*, что существенно снижает требования к скорости работы вычислительных устройств (ВУ). Для этого дополнительно реализована цикловая синхронизация демодулятора.

Структурная схема разработанного демодулятора представлена на рис.3. Входными воздействиями являются сигнал сброса, тактовый сигнал АЦП с частотой $f_{KB} = 4f_0$ и шина данных АЦП (разрядность шины задается параметризировано). Выходным сигналом является демодулированная последовательность принятых данных.

Для исследования аппаратных ресурсов использовались ПЛИС производства Xilinx [5,6] различных семейств: Spartan-6 (XC6SL25), Kintex-7 (XC7K70T), Artix-7 (XC7A100T) стоимостью \$22, \$174 и \$194 соответственно.



Сравнительная характеристика рассматриваемых семейств по количеству внутренних логических элементов приведена в таблице, где обозначены: Flip-Flop – D-триггер, LUT – коммутационный элемент, IOB – порты ввода/вывода, BUFG – глобальный буферный элемент, DSP48 – аппаратный умножитель.

ПЛИС	Flip-	LUT	IOB	BUFG	DSP
	Flop				48
Artix-7	12680	63400	210	32	240
Kintex-7	82000	41000	300	32	240
Spartan-6	30064	15032	226	16	38

Анализ использования аппаратных ресурсов и временные задержки для каждой ПЛИС проводился с помощью утилит PlanAhead, XPower Analyzer и Analyze Timing пакета ISE Design Suite 14.7 фирмы Xilinx

Временной анализ для ПЛИС XC6SL25 (Spartan-6) при фиксированных параметрах: разрядности АЦП R = 12, числе периодов несущей на символ N = 128, и длине передаваемых последовательностей M = 31, показал, что при частотах дискретизации ($f_{KB} = 4f_0$) 50 МГц, 100 МГц, 150 МГц и 200 МГц setup slack (время, за которое сигнал должен установиться до прихода следующего тактового импульса) соответственно равно 17,590 нс, 7,590 нс, 4,590 нс, 2,509 нс. Hold slack (время, которое сигнал должен удерживаться после прихода тактового импульса) на всех частотах равно 0,408 нс. Значения временных задержек гарантируют работу исследуемого алгоритма на всех рассматриваемых частотах дискретизации АЦП.

Анализ аппаратных затрат, требуемых на реализацию демодулятора, проведен при R = 12 и N = 128. Зависимости количества Flip-Flops и LUTs (в процентах для соответствующей ПЛИС) от длины принимаемой кодовой последовательности K показаны на рис.4 и рис. 5 соответственно. Так, увеличение длины передаваемых кодовых последовательностей приводит к увеличению числа используемых логических элементов примерно в

1,5—2 раза.

Оценка потребляемой мощности проводилась при R = 12, N = 128, K = 63 и частоте дискретизации 50МГц. Установлено, что ПЛИС седьмого поколения (ХС7А100Т и ХС7К70Т) потребляют 83 и 81 мВт соответственно, ПЛИС шестого поколения (ХС6SL25) – 34 мВт.







Рис. 5

Схема размещения (рис.6) модели демодулятора на кристалле (Spartan-6 – XC6SL25) при R = 12, N = 128, K = 63 позволяет провести визуальную оценку занимаемого места.



Рис. 6

Данные, полученные в ходе исследования, позволяют сделать вывод, что разработанная VHDL-модель демодулятора «в целом» обладает высоким быстродействием, требует минимум аппаратных ресурсов. Это дает возможность размещения на выбранных ПЛИС не только демодулятора, но и других цифровых блоков приемного устройства.

Литература

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений [Текст] / Л.М. Финк. - М.: Советское радио, 1970. - 728с.

2. A. N. Glushkov, V. P. Litvinenko, B. V. Matveev, O. V. Chernoyarov. Basic Algorithm for the Noncoherent Digital Processing of the Narrowband Radio Signals. Applied Mathematical Sciences, Vol. 9, 2015, no. 95, 4727 – 4735.

3. Патент РФ № 2556429 от 16.06.2015. Некогерентный цифровой демодулятор «в целом» кодированных сигналов с фазовой манипуляцией / В.П. Литвиненко, А.Н. Глушков, Д.Г. Пантенков

4. Бабак В. П. VHDL. Справочное пособие по основам языка [Текст] / В.П. Бабак, А.Г. Корченко, Н.П. Тимошенко, С.Ф. Филоненко. - Додэка - XXI, 2008. - 224 с.

5. Xilinx (2009a) Spartan-6 Family Overview, Vol. DS160 (V1.0), Xilinx Inc

6. Xilinx (2010a) 7 Series Overview, Vol. DS150 (V1.0), Xilinx Inc.

Воронежский институт МВД РФ Воронежский государственный технический университет

HARDWARE IMPLEMENTATION OF DIGITAL DEMODULATOR "AS A WHOLE" PHASE-SHIFT KEYED SIGNALS

A. N. Glushkov, V.P. Litvinenko, A.A. Shaforostova

Hardware implementation of digital demodulator "as a whole" PSK signals on the basis of field-programmable gate array (FPGA)

Key words: phase-shift keying, digital demodulation, noiseless coding, FPGA, VHDL

КОЛЬЦЕВОЙ МОНОБЛОЧНЫЙ ГИРОСКОП С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ: ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Н.А. Ус, С.П. Задорожний

В статье представлены результаты исследования возможных путей создания новой группы оптических лазерных гироскопических датчиков бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Предметом исследования являются особенности конструктивно-технологического решения кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом, реализующим эффект Саньяка. Обоснованы требования к деталям устройства гироскопа конструктивного и технологического плана. Представлены сравнительные оценки параметров нового датчика и его аналога – кольцевого газового лазерного гироскопа

Ключевые слова: эффект Саньяка, оптический гироскоп, конструкция, технология, лазерный диод

1. Оптическая интерферометрия в технике навигационных систем

Навигаиия наука об определении объектов. местоположения движущихся Ee важность определяется высокими требованиями, предъявляемыми к характеристикам подвижных объектов, которые движутся по земле, под водой, по воздуху и в космосе. Во всех этих случаях необходимо знать параметры движения местоположения объектов с большой точностью [1,2].

В связи с высокой стоимостью подвижных объектов навигационные приборы и системы должны отвечать ряду требований: быть надежными, обладать высокой точностью и отвечать специфическим требованиям. Последнее положение относится к военным подвижным объектам – воздушным и морским судам, наземной подвижной технике, ракетной и космической технике, различным робототехническим военным системам. В общем случае военные подвижные системы не могут получать информацию, передаваемую с помошью инфракрасных, оптических ультрафиолетовых, И радиоволн, эффективными поскольку противник обладает средствами постановки помех [4]. Считается, что в период боевых действий возможность комплексирования навигационной информации от спутниковых навигационных систем будет В связи с этим навигационные невозможна. системы военного назначения должны отвечать требованиям автономности. Среди них особое место занимают бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), которые легче комплексируются с навигационными приборами и системами ориентации, работающими на различных физических принципах [2].



Рис. 1. Прогноз востребованности различных типов гироскопов

Ус Николай Александрович – ВУНЦ ВВС «ВВА», д-р техн. наук, профессор, e-mail: <u>UNA.2012@yandex.ru</u> Задорожний Сергей Павлович – ВУНЦ ВВС «ВВА», старший преподаватель, тел. 8(920)404-42-22

Практическая реализация преимуществ БИНС связана с решением двух основных проблем [5]:

- создание чувствительных элементов с приемлемой для навигации точностью и существенно увеличенным динамическим диапазоном измерений;

- повышения производительности и микроминиатюризации бортовых вычислительных средств.

В рамках данной работы рассматривается первая проблема. Интересен прогноз востребованности различных типов гироскопов для динамических систем (рис. 1) [6].

Анализ показывает, что применительно к задачам навигации подвижных объектов в военной области наиболее востребованы два типа гироскопических систем: лазерные (ЛГ) и волоконно-оптические (ВОГ).

1.1. Эффект Саньяка

Существенную роль в развитии оптической интерферометрии сыграло появление газовых лазеров – источников света с высокой временной и пространственной когерентностью. Наличие такого источника оптического излучения позволило реализовать эффект Саньяка (рис. 2) в полной мере применительно к задачам оценки радиальных скоростей подвижных объектов с помощью кольцевых гироскопических датчиков [3].

В кольцевом оптическом резонаторе по оптическим каналам 3 создаются встречные волны лазерного (когерентного) излучения, генерируемые источником 1. Кольцевое движение оптических волн достигается системой зеркал 2,4. Причем, зеркала 4 являются зеркалами полного (100%) отражения, а зеркало 2 – полупрозрачным с коэффициентом пропускания не более 10%. В результате их сложения образуется стоячая волна, которая обладает свойством неподвижности в инерциальном пространстве по отношению к вращательному движению. Наблюдая 38 положением (перемещением) этой волны относительно корпуса прибора, можно судить об угловом положении и угловой скорости гироскопа. С помощью специального устройства, называемого формируется оптическим смесителем, интерференционная картина, перемещение полос которой в точности повторяет движение стоячей волны.



Рис. 2. Принцип реализации эффекта Саньяка

Уравнение волны, бегущей вдоль оси *x*, описывается уравнением:

$$y = A\sin\frac{2\pi}{\lambda}(x - ct), \qquad (1)$$

где A – амплитуда колебаний, λ – длина волны, c – скорость света.

Уравнение встречной бегущей волны имеет вид:

$$y = A\sin\frac{2\pi}{\lambda}(x+ct),$$
(2)

В результате сложения двух волн получим:

$$y = 2A\cos\frac{2\pi}{\lambda}ct \cdot \sin\frac{2\pi}{\lambda}x,$$
(3)

Это выражение можно рассматривать как пространственную синусоиду $\sin \frac{2\pi}{\lambda} x$ с амплитудой, меняющейся по гармоническому закону с частотой $v = \frac{2\pi}{\lambda} c$ световых колебаний.

Уравнение является уравнением стоячей волны.

Стоячая волна, в отличие от бегущей, не перемещается в пространстве со скоростью света. Одной из ее особенностей является наличие характерных точек, называемых узлами и пучностями. В узлах амплитуда колебаний равна нулю, а в пучностях достигает максимальных значений.

Частота следования интерференционных полос равна числу пучностей (узлов) стоячей волны N, проходящих через заданную точку в единицу времени, или, иначе говоря, укладывающихся на дуге, соответствующей углу φ , на который повернется прибор за ту же единицу времени:

$$f = \frac{N}{t} = \frac{\varphi}{\varphi_0 t} = \frac{\omega}{\varphi_0},\tag{4}$$

где φ_0 — угол между соседними узлами стоячей волны.

Если принять, что в оптической схеме имеется круговой оптический контур, получим:

$$\varphi_0 = \frac{\lambda}{2R} = \frac{\lambda \cdot 2\pi R}{4\pi R^2} = \frac{\lambda L}{4S} \tag{5}$$

Здесь L – длина резонатора, S – площадь, охватываемая кольцевым резонатором.

В итоге, частота следования интерференционных полос при реализации эффекта Саньяка, будет определяться следующим выражением:

$$f = \frac{\omega}{\varphi_0} = \frac{4S\omega}{\lambda L} = K\omega, \qquad (6)$$

Здесь К – масштабный коэффициент лазерного гироскопа, ω – скорость вращение гироскопа в рад/с в плоскости резонатора.

1.2. Оптические гироскопы

Современные оптические гироскопы, как правило, создаются на базе применения в качестве

активных оптических источников лазерных источников излучения – газовых лазеров и полупроводниковых лазерных диодов.

Кольцевой газовый лазерный гироскоп. В кольцевом газовом лазерном (КГЛ) гироскопе носителем информации об угловой скорости относительно инерциального пространства является электромагнитное излучение, параметры которого изменяются в зависимости от вектора угловой скорости вращения. Фактически, это квантовый прибор с кольцевым активным резонатором, в котором излучения (1) и (2) распространяются навстречу друг другу и выводятся на интерференционный оптический смеситель. На его выходе образуется сигнал разностной частоты (3) интерферирующих встречных волн. Практически здесь реализуется известный эффект Саньяка [4].

Кольцевым резонатором является оптическая система, состоящая из трех или более отражателей, в которой траектория лазерного луча замкнута и лазерный луч, пройдя через все оптические элементы, замыкается сам на себя в плоскости резонатора. В настоящее время получили распространение моноблочные конструкции кольцевого газового лазера треугольной и четырех угольной схемы.

К достоинствам газового лазерного гироскопа можно отнести: относительно малые габариты и компактность конструктивного плана, высокий коэффициент чувствительности. связанный C монохромным электромагнитным излучением газового лазера и присутствие эффекта оптического усиления. Недостатки такого гироскопического датчика определяются, прежде всего конструктивно-технологического особенностями решения газового лазера кольцевого типа: существенной дороговизной комплектующих изделий и применяемых материалов (кварцевого стекло/ситалл). сложностью технологии изготовления (создание активной газовой среды в замкнутом оптическом контуре, герметизация оптического контура при юстировке системы), наличием высоковольтного источника питания и вытекающими отсюда последствиями. Введение в оптический контур дополнительных корректирующих элементов типа контроллеров поляризации, фазовых модуляторов, ячеек Фарадея и т.п. снижает общую добротность контура.

Волоконно-оптический гироскоп. Известны различные волоконно-оптические конструкции лазерного гироскопа [7, 8]. Типовая конструкция волоконно-оптического лазерного гироскопа с пассивным оптическим контуром описана в [3]. Полупроводниковый волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) фактически является классическим интерферометром Саньяка. Здесь круговой оптический контур заменен на катушку с оптическим волокном длиной 500 - 2000 м. и более, намотанным на специальном каркасе диаметром не менее 50 мм., который служит конструктивной основой прибора и обеспечивает повышение чувствительности гироскопа. Для обеспечения условия монохромности оптоволокно используется одномодовое. Все остальные элементы ВОГ крепятся на этом каркасе. Активным излучателем в схеме является полупроводниковый лазер.

Повышение чувствительности кольцевых резонаторов за счет создания многовитковой системы на основе одномодового оптического волокна приводит к тому, что в контуре наблюдается изменение поляризации в точках ее начала и конца. Введение в контур дополнительных корректирующих элементов типа контроллеров поляризации, фазовых модуляторов, ячеек фарадея и т.п. также снижает общую добротность контура.

Тем не менее, в совокупности в ВОГ приемлемая достигается чувствительность датчика, небольшие масса-габаритные параметры, достаточно низкая потребляемая мощность, большой диапазон измеряемых угловых скоростей, возможность масштабирования геометрических размеров конструкции вариания и чувствительностью схемы в пределах заданного соотношения параметра изделия «цена-качество». Главный недостаток таких систем – достаточно низкокогерентный источник света по сравнению с газовым лазером, а также недостаточная жесткость конструкции при многослойной намотке световолокна и вытекающие отсюда проблемы с временной нестабильностью.

1.3. Конструктивно-технологические посылки развития лазерных гироскопов

Как показывает проведенный анализ особенностей создания и работы кольцевого лазерного и волоконно-оптического гироскопов в плане повышения временной нестабильности разрабатываемая новая перспективная конструкция лазерного гироскопа должна базироваться на моноблочном оптическом контуре с открытыми оптическими каналами И использовать полупроводниковый источник лазерный электромагнитного излучения качестве в оптического элемента накачки.

конструктивных Такая интеграция особенностей в новой конструкции лазерного гироскопа позволит применить более дешевые конструкционные материалы, например. органическое стекло, оптический полистирол и т.п. Это существенно упрощает технологию создания оптического моноблока и позволяет применить большее количество стандартных изделий линейки полупроводниковых лазерных диодов, элементы обвязки оптического контура моноблока на базе стандартных зеркал. При этом новый тип лазерного гироскопа можно классифицировать как кольцевой моноблочный гироскоп (КМГ) с полупроводниковым лазерным диодом.

Потенциальные качественные показатели нового типа лазерного гироскопа будут определяться, в первую очередь, жесткостью конструкции оптического моноблока как базовой структурой изделия. Надежность работы будет

определяться функциональными возможностями лазерного излучателя, работоспособность которого выше газовых аналогов. много Питаюшие напряжения таких приборов составляют 2,5-5,0 В. При соответствующих расчетах длины оптического канала с учетом рабочей длины волны полупроводникового лазерного диода пассивный оптический моноблок можно переводить в резонансный режим, что позволит повысить добротность системы и, как следствие, добиться более высокой временной стабильности.

изделия Себестоимость такого будет существенно ниже известных лазерных гироскопов, так как полимерные материалы, при условии открытости оптических каналов, позволят применять при создании оптического моноблока прямые методы обработки, например, сверление, или термическую обработку. Допустим и способ литья под давлением. Технология настройки и юстировки изделия при открытых оптических каналах оптического моноблока лостаточно тривиальна.

Во всей этой ситуации проблематичной является необходимость создания высоконадежного двунаправленного источника когерентного электромагнитного излучения.

2. Кольцевой моноблочный гироскоп на базе полупроводникового лазерного диода

Задача формирования двунаправленного лазерного луча может решаться различными способами. Например, в ВОГ эта задача решается с помощью полупрозрачной стеклянной пластинки – расщепителя оптического электромагнитного излучения. Однако конструкция такого плана менее всего подходит в изделии, которое должно эксплуатироваться на подвижных объектах в условиях жесткой вибрации.

В работе предлагается два варианта кольцевого моноблочного гироскопа на базе полупроводникового диода, новизна технических решений защищена двумя патентами РФ [9,10].

2.1. Конструктивная схема пассивного моноблочного кольцевого резонатора

Для создания двунаправленного режима лазерного луча предлагается использовать внешний оптический пассивный резонатор специальной конструкции, в котором реализуется известная схема Фабри-Перо. Это позволит дополнительно скорректировать волновой фронт полупроводникового лазера излучения И двунаправленное обеспечить излучение в пассивном оптическом кольцевом резонаторе. При этом вся оптическая конструкция может быть реализована, например, на базе органического стекла без дополнительных условий на герметизацию оптических каналов моноблока. Данное положение определяет более простую технологию изготовления и низкий процент брака при равных параметрах временной стабильности гироскопа. В качестве технических решений оптического резонатора предлагается два методических подхода, основанного на применении плавно изменяющихся и линейно-ломанных поверхностях.

В работе предлагается использовать пассивный внешний оптический резонатор в виде полусферы или усеченной призмы.

Кольцевой лазерный гироскоп с внешним оптическим резонатором в виде усеченной призмы. В конструктивно-технологическом плане разработка (рис. 3) отличается открытой кольцевой моноблочной схемой, в которой двунаправленный режим излучения лазерного диода реализуется внешним оптическим резонатором в виде усеченной призмы [9].

Предлагаемая конструкция устройства содержит: 1 – треугольный оптический моноблок; 2 – цилиндрические каналы; 3,4 – зеркала с высокой отражательной способностью; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – призму; 7 – дополнительный оптический резонатор; 8 – полупроводниковый лазер.

Треугольный оптический моноблок 1 может быть изготовлен из оптически прозрачного материала, в котором просверлены цилиндрические каналы 2. Оси этих каналов лежат в одной плоскости образуют равносторонний И треугольник, в вершинах которого расположены зеркала 3,4 и 5. Зеркала 3 и 4 имеют отражательную поверхность с очень высокой отражательной способностью в диапазоне рабочих частот излучения, что достигается применением многослойного диэлектрического покрытия [3]. Зеркало 5 является полупрозрачным, благодаря чему осуществляется вывод лучистой энергии из контура для съема выходного сигнала. Поверхность отражающего зеркала 4 выполнена в виде участка большого радиуса. что позволяет сферы значительно упростить юстировку оптического контура моноблока 1.

Устройство лазерного гироскопа работает следующим образом. При подаче низковольтного питания на лазерный диод 8 последний генерирует многомодовое излучение. нормального Для функционирования заявляемого устройства целесообразно, чтобы излучение было максимально близко одномодовому. Дополнительный к оптический резонатор 7 фактически является пассивным резонатором Фабри-Перо. Его конструкция позволяет сформировать узконаправленное и двухстороннее излучение от лазерного диода 8 в горизонтальном оптическом канале. Фактически имеет место почти плоский волновой фронт, а само излучение, является узконаправленным и двухсторонним.



Рис. 3. Схема кольцевого лазерного гироскопа с внешним оптическим резонатором в виде усеченной призмы

Данное излучение системой зеркал 3,4,5 юстируется таким образом, чтобы световой луч беспрепятственно двигался по замкнутому конуру, образованному тремя цилиндрическими каналами 2. В итоге, в контуре циркулируют во взаимно противоположных направлениях электромагнитные поля излучения лазерного диода 8 и при отсутствии изменяющейся абсолютной угловой скорости устанавливается система стоячих волн. Среднее угловое положение узлов и пучностей этой системы координат не изменяется при отсутствии вращения контура (моноблока 1) вокруг своей оси, перпендикулярной к его плоскости, что объясняется присутствием частот излучений, распространяющихся в разные стороны по оптическому контуру.

Для съема выходного сигнала лазерного датчика угловых скоростей (лазерного гироскопа) полупрозрачным зеркалом 5 и призмой 6 встречные лучи выводятся из контура под малым углом друг к другу. Образуемая при этом интерференционная картина, представляющая собой интерференционные полосы следующие друг за другом определенной разностью с частот, фиксируется фотоприемником, входящим в систему обработки информационного сигнала от лазерного гироскопа. На его выходе получается электрический сигнал переменного тока. Как обработки правило, система реализует преобразование типа «частота-код». Частота этого тока пропорциональна измеряемой абсолютной угловой скорости вращения моноблока 1 вокруг оси. Фазовая составляющая частоты своей выходного сигнала указывает на направление угловой скорости вращения. В совокупности обеспечивается цифровая обработка информационного сигнала гироскопа в интересах потребителя.

Кольцевой лазерный гироскоп с внешним оптическим резонатором в виде *полусферы*. В конструктивно-технологическом плане разработка отличается от предыдущей только внешним оптическим резонатором, который выполнен в виде полусферы [10]. В итоге пассивная часть кольцевого моноблока в новой конструкции в зависимости от его типа определяется только посадочным местом под внешний оптический резонатор 7.

В опытном образце моноблок был реализован из органического стекла с длиной оптического канала 50 мм. Система зеркал изготавливалась из оптического стекла КО-8 с напылением в вакууме пленок алюминия. Для создания ~10% пропускания оптического сигнала из контура моноблока обеспечивалась пленкой 0,7 - 0,8 мкм. Во всех других вариантах она превышала значение мкм. Призма в интерферометрическом 1,5 использовалась ОТ известного смесителе интерферометрического преобразователя.

Опытный экземпляр указанного гироскопа показал параметры соответствующие навигационной системе средней точности.

2.2. Конструктивно-технологические схемы внешнего оптического резонатора

Конструктивно-технологическое решение двух вариантов внешних оптических резонаторов, основанных на применении плавно изменяющихся и линейно-ломанных поверхностях, показано на рис. 4. Следует отметить, что такого типа резонаторы нормально функционируют с многомодовыми лазерными излучателями.

Применение плавно изменяющейся поверхности предлагается на базе полусферы. Конструктивное решение такого оптического резонатора приведено на рис. 4а.

Оптический резонатор представляет собой полусферу диаметром D. Под полупроводниковый лазерный диод сформировано посадочное место диаметром С. Данный оптический резонатор позволяет дополнительно скорректировать волновой фронт излучения полупроводникового лазера, поскольку непосредственно устройство является многомодовой структурой. Полусфера резонатора изготавливается из того же материала, интерферометра, моноблок например, что органического стекла. Конструктивно полусфера резонатора усечена симметрично относительно центральной оси симметрии с обеих сторон до толщины оптического моноблока L и покрыта светоотражающим покрытием, например, тонкопленочных покрытий из меди (Cu), серебра (Ag) или алюминия (Al). В итоге, оптический резонатор фактически образует резонатор Фабри-Перо.

Вдоль продольной симметрии оси оптического резонатора сформированы два оптически прозрачных отверстия на уровне Н, совпадающих с уровнем оптических каналов моноблока, за счет которых реализуется в резонаторе излучателя продольный оптический канал диаметром В по геометрии и положению совпадающий основным цилиндрическим с каналом моноблока интерферометра.

Применение линейно-ломанной поверхности усеченной призмы. предлагается на базе Конструктивное решение такого оптического резонатора приведено на рис. 4б. Усеченная призма имеет основание L, высоту D и толщину равной толщине моноблока. Боковые грани усеченной призмы образуют с основанием угол β, равный 40÷60 градусов. В оптическом резонаторе сформировано посадочное место под полупроводниковый лазерный диод диаметром С.

резонатора Усеченная призма изготавливается из того же материала, что и моноблок интерферометра. Поверхность резонатора аналогично покрыта светоотражающим покрытием, например, тонкопленочных покрытий из меди (Cu), серебра (Ag) или алюминия (Al), чем достигается режим Фабри-Перо.

Параллельно основанию резонатора на боковых гранях сформированы два оптически прозрачных отверстия на уровне Н, совпадающем с уровнем оптических цилиндрических каналов моноблока интерферометра. Это позволяет создать в резонаторе излучателя продольный оптический канал диаметром В, по геометрии и положению совпадающему с основным цилиндрическим каналом моноблока интерферометра.

В итоге, в обеих конструкциях оптических резонаторов излучение от полупроводникового лазера формируется в виде параллельного пучка вдоль созданного канала, т.е. имеет место почти плоский волновой фронт, а излучение является узконаправленным и двухсторонним.



Рис. 4. Конструктивно-технологическое решение внешних оптических резонаторов а) симметрично усеченная полусфера, б) усеченная призма

В процессе испытаний опытные образцы изготавливались из органического стекла. Внешняя поверхность оптических резонаторов была покрыта светоотражающим покрытием, толщина которого позволяла создавать полное внутреннее отражение в его объеме для электромагнитной волны полупроводникового лазера. В экспериментальных образцах толщина пленки алюминия составляла 1,5 – 2,0 мкм, что позволяло использовать рабочую длину лазерного диода равной 1,5 мкм. Следует заметить, что при вакуумном напылении покрытия имели место трудности с нагреванием объекта. При этом рабочая температура не превышала 95°С, а прочность пленки была достаточна для испытаний.

Экспериментальные исследования лвух конструктивных решений оптических резонаторов для моноблочных интерферометров на рабочей длине волны 1,5 мкм при выходной мощности лазерного диода в 100 мВт показали, что по эффективности критерию формирования выходного сигнала в продольном оптическом канале резонатора предпочтение следует отдавать схеме с линейно-ломанными поверхностями. Данное положение можно объяснить существенной нелинейностью объема резонатора, что приводит к более быстрому преобразованию оптического сигнала лазерного диода к плоскопараллельному вилу в формируемом оптическом канале резонатора.

Следует отметить, что частотные свойства обоих резонаторов приблизительно одинаковы на уровне выходной мощности 0,5.

Выводы

Использование разработанного конструктивно-технологического решения лазерного гироскопа позволяет модифицировать известные схемы оптических гироскопов для навигационных систем подвижных объектов.

Новый технический результат состоит в следующем:

1. Конструкция устройства объединяет совокупность оригинальных и стандартных деталей отечественного производства с низкой себестоимостью.

2. Возможность масштабирования конструкции датчика позволяет варьировать его точностью при минимальных издержках его производства.

3. Потенциальная стабильность гироскопа данной конструкции при использовании современных цифровых схем на основе АЦП для обработки динамической интерференционной картины с выхода датчика не хуже 0,01 град/ч.

Литература

1. Андреев, В.Д. Теория инерциальной навигации. Автономные системы [Текст] / В.Д. Андреев. – М.: Наука, 1966. – 580 с.

2. Соколов, С.В. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных навигационных систем [Текст] / С.В. Соколов, В.А. Погорелов. Под ред. В.А. Погорелова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. –184 с.

3. Байбородин, Ю.В. Основы лазерной техники [Текст]. / Ю.В. Байбородин. – 2-е изд., перераб. и доп Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1988. – 388 с.

4. Обзор концепций средств противоракетной и противокосмической оборы за рубежом [Текст] // Новости зарубежной науки и техники. – 1986. – № 3,4. – С.1-66.

5. Анучин, Н.О. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов [Текст] / Н.О. Анучин, Г.И. Емельянцев. – СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 1999. – 365 с.

6. Филатов Ю.В. Оптические гироскопы [Текст] / Ю.В. Филатов. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – 139 с.

7. Иванов, В.В. Наблюдение эффекта Саньяка в кольцевом резонаторном интерферометре с низкокогерентным источником света [Текст] / В.В. Иванов, М.А. Новиков, В.М. Геликонов // Квантовая электроника. – 30. – №2 (2000). – С.119-124.

8. Бугусов, М.М. Волоконная оптика в приборостроении [Текст] / М.М. Бугусов. –М.: Машиностроение, 1985. – С.143-159.

9. Лазерный гироскоп: пат. 2488773 Российская Федерация, МПК G01N. [Текст] / Ус Н.А.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) (RU). – №2011144273; заявл. 01.07.2011; опубл. 27.07.2013, Бюл. № 21. – 10 с.: ил.

10. Лазерный гироскоп: пат. 2507482 Российская Федерация, МПК G 01С 19/66. [Текст] / Ус Н.А.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) (RU). – №2011152926/28; заявл. 23.12.2011; опубл.20.02.14 Бюл.№5 – 10 с.: ил.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж

RING PACKAGED GYROSCOPE WITH A SEMICONDUCTOR LASER DIODE: FEATURES OF CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

N.A. Us, S.P. Zadorozhny

The article presents the results of a study of possible ways to create a new group optic sensors laser gyro strapdown inertial navigation systems. The subject of research are the features of constructive and technological solutions of monoblock ring gyroscope with a semiconductor laser diode that implements the Sagnac effect. Substantiated the requirements to the parts of the device gyroscope structural and technological plan. Presents comparative estimates of the parameters of the new sensor and its analog – gas ring laser gyroscope

Key words: Sagnac effect, the optical gyro, design, technology, laser diode

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА МНОГОРАЗРЯДНЫХ КМОП-КНИ-ЦАП НА ИСТОЧНИКАХ ТОКА

В.С. Кононов

Рассмотрены недостатки производственной калибровки параметров КМОП-ЦАП. Показаны ограниченные возможности известных способов автоматической калибровки. Приведен новый способ автоматической калибровки, основанный на использовании входного тактового сигнала для получения набора двоично-взвешенных опорных напряжений

Ключевые слова: КМОП, ЦАП, источник, калибровка

При создании современных высокоточных систем сбора и распределения данных требуются цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) с разрядностью не менее 16 бит и частотой преобразования до 500-1000 МГц. Проектирование и производство таких ЦАП является весьма сложной задачей. Даже наиболее продвинутые КМОП-технологии с воспроизводимостью 1-2 % не позволяют организовать производство большинства современных ЦАП без проведения калибровки параметров на заключительном этапе изготовления преобразователей. Однако на этом проблемы не заканчиваются. Как показала практика, при эксплуатации многоразрядных ЦАП (особенно в жестких условиях) происходит ухудшение точностных характеристик, несмотря на проведенную до этого производственную калибровку. Основными причинами такого ухудшения параметров являются эффекты старения полупроводниковой структуры и влияние одиночных частиц космического происхождения [1, 2].

Исходя из вышеизложенного стало понятно, что без применения автоматической калибровки наладить успешное проектирование и производство многоразрядных КМОП-ЦАП широкого назначения не представляется возможным.

Целью данной статьи является проведение анализа известных способов автоматической калибровки и разработка на его основе нового способа с более высокой эффективностью.

Применительно к нашему случаю на рис. 1 показан N-разрядный КМОП-ЦАП на источниках тока [3].

Как видно из рис. 1, а источники тока являются двоично-взвешенными. Именно с этим обстоятельством связаны практические проблемы производства КМОП-ЦАП, для разрешения которых требуется автоматическая калибровка. Проще говоря, двоичное взвешивание токов, предусматриваемое при проектировании топологии КМОП-ЦАП, нарушается в процессе изготовления из-за технологических разбросов геометрических размеров и электрофизических характеристик составляющих транзисторов (в нашем случае РМОПтранзисторов).



Рис. 1. Блок-схема N-разрядного ЦАП на источниках тока (а) и базовая ячейка такого ЦАП на РМОПтранзисторах (б):

U_п – напряжение питания; Вых, Вых – токовые выходы

Самым простым и наиболее распространенным способом компенсации технологических разбросов является использование магазинов РМОП-транзисторов с разными размерами для каждого источника тока. В результате путем перебора РМОП-транзисторов подбирается один из них (или в сочетании с другими) с током стока, наиболее близким к заданному «весовому» току источника. Нетрудно догадаться, что при N \ge 16-18 бит размер каждого магазина должен быть достаточно большим, чтобы гарантировать высокую точность калибровки. Следствием такого требования является существенное возрастание площади кристалла и усложнение аппаратной реализации процедуры калибровки.

Кононов Владимир Сергеевич – ОАО «СКТБ ЭС», канд. техн. наук, науч. сотрудник, тел. 8(473) 223-46-79

Более эффективным является новое техническое решение, основанное на использовании подканальной области РМОП-транзистора в качестве второго затвора при управлении током канала этого транзистора (рис. 2).



Рис. 2. Схема включения транзистора (а) и электрическая зависимость (б), иллюстрирующие влияние подканальной области на ток стока I_c :

 $U_{s},\;U_{c},\;U_{\kappa}$ – напряжения на затворе, стоке и подканальной области соответственно

Зависимость, показанная на рис. 2, б, отражает реальное влияние прямого смещения истокового перехода на ток стока. На практике эта зависимость с избытком перекрывает потребность в изменении тока стока при калибровке «весовых» токов. Здесь важно отметить, что прямое смещение истокового рп-перехода до $\sim 0,5$ В в КМОП-КНИ-структуре не приводит к нежелательным последствиям, в то время как в обычной КМОП-структуре на объемном кремнии такое смещение с большой вероятностью может привести к срабатыванию паразитного тиристора (особенно при воздействии космических излучений).

Рассмотренное техническое решение выгодно отличается от известных решений. Вопервых, это решение не требует использования магазинов транзисторов, которые занимают много места (особенно в старших разрядах). Во-вторых, аппаратные затраты на организацию калибровки, как следует из рис. 3, сводятся к использованию только одного резистора R_k для управления смещением подканальной области в каждом «весовом» РМОП-транзисторе, который располагается рядом с таким транзистором, а калибрующий ЦАП, задающий ток через резистор Rk, собирается на МОПтранзисторах с минимально-возможными размерами и выносится на периферию кристалла, не приводя к заметному увеличению размеров

базового КМОП-КНИ-ЦАП. При этом аппаратные затраты на организацию калибровки по известному способу существенно больше, так как каждый магазинный транзистор предполагает размещение рядом с ним дополнительного ключевого МОП-транзистора для его коммутации.



Рис. 3. Схема, иллюстрирующая аппаратную организацию калибровки КМОП-КНИ-ЦАП по новому способу

В заключение рассмотрим технику контроля «весовых» токов в процессе калибровки.

В отличие от производственной калибровки, когда решение о достаточности подстройки «весового» тока обычно принимается человеком, при автоматической калибровке такое решение «принимает» компаратор в результате сравнения «весового» тока с соответствующим ему опорным током, задаваемым исходя из условия двоичного взвешивания (см. рис. 1). Отсюда напрашивается предположение, что организацию автоматической калибровки можно свести к созданию необходимого набора источников опорных токов или соответствующего им набора источников опорных напряжений. Теоретически это выглядит достаточно простой задачей. Однако, если учесть, что для создания источников опорных напряжений при N ≥ 16-18 бит необходимы высокостабильные устройства, которые на практике сами нуждаются в периодической калибровке, причем далеко не тривиальной, то такая задача не находит приемлемого решения.

Выход из создавшегося положения можно найти, если воспользоваться техникой полкачки заряда в системах фазовой автоподстройки частоты [4]. Тогда для получения N-го количества источников опорных напряжений необходимо поделить частоту входного тактового сигнала последовательно на 2, 4, 8, ..., N, а затем с помощью генератора одиночных импульсов (ГОИ) и зарядовой помпы на RC-элементах преобразовать напряжение на конденсаторе внапряжение на опорном входе компаратора (рис. 4). ГОИ необходим для обеспечения контролируемого изменения скважности сигнала на входе RC-цепи.


Рис. 4. Блок-схема, иллюстрирующая технику калибровки «весовых» токов: TC – тактовый сигнал; Вых – выход компаратора для контроля процесса калибровки; I_i – «весовой» ток

В результате калибровка «весовых» токов будет сводиться к достижению равенства напряжений на резисторах R'_0 и R''_0 , которые выбираются одинаковыми ($R'_0 = R''_0 = R_0$).

Так как напряжение на конденсаторе зависит только от скважности сигнала на входе RCцепи и не зависит от частоты этого сигнала, то, используя для деления частоты набор триггеров Т-типа, можно получить соответствующий набор опорных напряжений на резисторе R'_0 , которые практически не нуждаются в какойлибо подстройке. При этом сам факт независимости опорных напряжений от частоты тактового сигнала делает рассмотренный подход чрезвычайно привлекательным при организации автоматической калибровки.

Выводы. Предложенный способ калибровки, основанный на использовании подканальной области МОП-транзистора в качестве второго затвора, отличается чрезвычайно низкими затратами площади кристалла на размещение средств калибровки (вместо магазина транзисторов требуется всего лишь один резистор) и достаточно простой аппаратной реализацией алгоритма калибровки.

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов [Текст] / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – Т. 1. – 456 с.

2. Анашин В.С. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов [Текст] / В.С. Анашин, В.В. Бодин, В.Ф. Герасимов [и др.]; под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.

3. Кестер, У. Аналого-цифровое преобразование [Текст] : монография / У. Кестер; пер. с англ. Е.Б. Володина. – М.: Техносфера, 2007. – 1016 с.

4. Baker R.J. CMOS: Circuit Design, Layout and Simulation [Text] / R.J. Baker – IEEE Press, 2005. – 1039 p.

ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», г. Воронеж

AUTO-CALIBRATION TECHNIQUE FOR MULTIBIT CMOS-SOI-DAC WITH CURRENT SOURCES

V.S. Kononov

Disadvantages of factory calibration of CMOS-DAC parameters are considered. Limited abilities of known autocalibration techniques are shown. A new auto-calibration technique is offered, based on usage of input clock signal to provide set of binary-weighted voltage references

Key words: CMOS, DAC, source, calibration

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ 8-БИТНОГО АЦП ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ ВЫБОРКИ 75 МГц С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ САПР САДЕNCE

А.В. Строгонов, С.В. Жигульский, В.С. Пожидаев

В статье рассматриваются проектирование контроллера для 8-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) последовательного приближения на языке Verilog-HDL и полный маршрут синтеза топологии с использованием программных средств САПР Cadence

Ключевые слова: контроллер, АЦП, язык описания аппаратных средств Verilog, Cadence

АЦП последовательного приближения (АЦП ПП) занимает промежуточное положение по быстродействию, стоимости и разрешающей способности между последовательно-параллельными и интегрирующими АЦП и находит широкое применение в системах управления, контроля и цифровой обработки сигналов. В АЦП ПП формирование каждого бита осуществляется за один цикл. Поэтому n-разрядному АЦП требуется для преобразования n циклов. И как следствие, недостатком данного типа АЦП является достаточно большое время преобразования [1].

Быстродействие АЦП данного типа определяется суммой времени установления весов ЦАП до установившегося значения с погрешностью, не превышающей половины младшего значащего разряда (МЗР), времени переключения компаратора и задержки распространения сигнала в регистре последовательного приближения. Время установления заряда в ЦАП уменьшается с уменьшением веса разряда. Следовательно, для определения младших разрядов может быть использована более высокая тактовая частота [1]. Для уменьшения времени преобразования АЦП в его состав предлагается включить вместо регистра последовательных приближений (РПП) контроллер для дальнейшей реализации поразрядной вариации частоты.

В данной статье рассмотрено проектирование контроллера 8-битного АЦП ПП с частотой выборки 75 МГц по 180 нм БиКМОП-технологии с использованием современных средств САПР, позволяющих разрабатывать сложно-функциональные устройства в кратчайшие сроки [2-5].

Аналоговая часть в АЦП обычно занимает более 70 % площади топологической схемы. Поэтому проектирование цифровой части БИС целесообразно выполнять только после завершения проектирования аналоговой. Трудоёмкая работа по проектированию электрической схемы контроллера АЦП на уровне вентилей заменена на автоматический синтез из поведенческого описания устройства на высокоуровневом языке Verilog-HDL с использованием программного обеспечения САПР Cadence. Так же, описание проекта на поведенческом уровне на языке Verilog обеспечивает независимость его реализации от технологии.

Основными блоками АЦП последовательного приближения (АЦП ПП) являются: устройство выборки-хранения (YBX), компаратор, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и цифровая управляющая логика (контроллер), наиболее значимой частью которой является РПП [6]. В состав контроллера также входят система управления устройством выборки и хранения (УВХ), сброса ЦАП и параллельный интерфейс вывода данных. УВХ и сброс ЦАП управляется сигналом «sh». При подаче внешнего сигнала «go» происходит инициализация контроллера и сброс ЦАП, а УВХ переходит в состояние хранения значения входного сигнала. Выход УВХ подключен к одному из входов компаратора, в то время как другой вход подключен к выходу ЦАП. Старший значащий разряд (СЗР) РПП устанавливается в «1». Если выходное напряжение ЦАП больше, чем напряжение на выходе УВХ, выход компаратора, подключенный к контроллеру, устанавливается в «0» и старший разряд РПП сбрасывается, в противном случае он остается установленным.

Далее, следующий значащий разряд устанавливается в «1». Процесс повторяется до тех пор, пока все разряды РПП не будут установлены. После установки младшего значащего разряда (МЗР) на выходе контроллера появится сигнал завершения преобразования «drdy», разрешающий считывание данных принимающему устройству. В это время контроллер переводит УВХ в режим выборки входного сигнала, а также производит сброс ЦАП, после чего начинается новый цикл преобразования [7].

Рассмотрим подробнее процесс разработки контроллера. На рис. 1 представлен упрощенный маршрут проектирования цифровых блоков БИС с использованием программных средств САПР Cadence.

Строгонов Андрей Владимирович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: andreis@hotmail.ru, тел. 8(473)2437695

Жигульский Серафим Вячеславович – ОАО "СКТБ ЭС", аспирант, e-mail: jiguls@yandex.ru

Пожидаев Вадим Сергеевич – ОАО "СКТБ ЭС", аспирант, e-mail: vadim.s.pozhidaev@gmail.ru



Рис. 1. Упрощенный маршрут проектирования цифрового блока БИС в САПР Cadence

Пример 1 демонстрирует синтезопригодное описание контроллера 8-битного АЦП на языке Verilog HDL.

module sar tda(clock, reset, cmp, go, sh, drdy, result, dat2dac); // when cmp == 0 we clear prev estimated bit input clock, reset, cmp, go; output sh, drdy; output [7:0] result, dat2dac; reg [8:0] sreg; // shift register reg [7:0] prev sreg; // delayed shift reg reg [7:0] result; // registered result reg [7:0] dat2dac; // data to dac input reg first run; always @(posedge clock) begin if (reset $| (!go) \rangle // reset (act 1) or go (act 0)$ begin sreg <= 9'b00000 00001; $dat2dac \le 8'b0;$ prev sreg <= 8'b0; first run $\leq 1'b1$; // prevent set drdy line when there isn't valid result end else // conversion begin if (prev sreg == 8'b1) first run \leq 1'b0; // can freely tune phase of reset first run if (sreg == 9'h400) result \leq dat2dac; //conv ends $dat2dac \leq (dat2dac^{(prev sreg \&$ {8{~cmp}}) | sreg[8:1]; // set and/or reset active $sreg \le {sreg[0], sreg[8:1]}; // right shift;$ prev_sreg <= sreg[8:1];</pre> end end // end always assign drdy = ~first_run & prev_sreg[7]; //dready assign $sh = \sim sreg[8] | clock; // sh - active 0$ endmodule Пример 1. Синтезопригодное описание контроллера 8-битного АЦП на языке Verilog HDL

На рис. 2 приведены результаты функционального моделирования разработанного кода в утилите NCLaunch.



Рис. 2. Результат функционального моделирования контроллера 8-битного АЦП ПП в среде NCLaunch

Логический синтез является важным этапом в маршруте синтеза цифровых схем из RTL описания. На этом этапе проводится процесс разделения описания на логические модули и синтезируется логическая схема во внутренней технологической библиотеке.

Инструментом реализации проекта в базисе библиотечных элементов производителя ИС служат средства логического синтеза RTLCompiler. RTLCompiler позволяет осуществлять логический синтез с учетом физических и технологических особенностей проектируемого кристалла или IPблока. В дальнейшем полученный в результате синтеза список цепей и файл временных задержек служат входной информацией для трассировки топологии кристалла в SoC Encounter.

SoC Encounter предназначен для проведения автоматического синтеза и предразмещения элементов цифровых схем, построенных на стандартных библиотечных элементах. Использование SoC Encounter на этапе синтеза позволяет значительно сократить цикл проектирования топологии и уменьшить затраты. Выходными данными среды SoC Encounter являются представление топологии в формате GDSII (рис. 3) и список цепей на вентильном уровне для среды Virtuoso.

На этапе синтеза топологии были произведены: реализация проекта в базисе библиотек производителя ИС, предварительное размещение, планирование шин питания и иерархии тактового сигнала, качественная оценка возможных искажений сигналов.

После синтеза и проверки топологии в приложении SoC Encounter был произведён импорт полученной топологии и схемы контроллера из списка цепей соединений логических элементов в приложение Virtuoso (рис.4), где были автоматически созданы представления топологии (layout), схемы (schematic) и символа (symbol), соответствующего схеме.



Рис. 3. Топологическое представление контроллера 8-битного АЦП ПП в SoC Encounter

В приложении Virtuoso с помощью утилиты Assura произведена проверка топологии на требования электрическим (ERC), конструктивнотехнологическим нормам проектирования (DRC) и на соответствие электрической схеме (LVS).

Финальная проверка работоспособности контроллера в постсинтезном моделировании, заключается в сравнении результатов функционального и схемотехнического моделирования с учетом RCпаразитов. С помощью инструмента Virtuoso ADE (Analog Design Environment) можно интегрировать различные системы аналогового моделирования (Spice, Spectre, UltraSim, Multi-mode Simulation), обепечивать обратную аннотацию паразитных параметров, экстрагируемых с помощью Assura RC, поддерживать кросс-пробинг между схемным вводом (Virtuoso Schematic Editor), топологическим редактором (Virtuoso Layout Editor) и системой анализа результатов моделирования.

В данной статье на примере проектирования контроллера АЦП по методу последовательных приближений показан системный уровень проектирования заказных БИС с использованием программных средств Cadence: NClaunch, RTLCompiler, SoC Encounter.

В ходе проектирования была разработана RTL-модель контроллера АЦП, его схемное и топологическое представления, которые могут быть использованы для разработки индустриальных



Рис. 4. Топологическое представление контроллера 8-битного АЦП ПП в Virtuoso

АЦП по методу последовательных приближений в виде сложно-функционального блока, представляющего собой законченное устройство, с оптимизированной схемой и топологией.

Литература

1. Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналоголого-цифровых электронных устройств[Текст] / Г.И. Волович. - М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005 – 528 с.

2. Cadence Encounter Digital Implementation System https://www.cadence.com

3. SoC Encounter RTL-to-GDSII System http://www.cadence.com/rl/Resources/datasheets/soc_encoun ter ds.pdf

4. Encounter RTL Compiler Advanced Physical Option http://www.cadence.com/rl/Resources/

datasheets/rtl_physical_ds.pdf

5. Cadence Encounter Digital Implementation System http://www.cadence.com/rl/Resources/

datasheets/edi_system_ds.pdf

6. Эннс, В.И. Проектирование аналоговых КМОПмикросхем: краткий справочник разработчика [Текст] / В.И. Эннс, Ю.М. Кобзев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 454 с.

7. Anderson T.O. Optimum Control Logic for Successive Approximation Analog-to-Digital Converters / T.O. Anderson // Computer Design. – 1996. – Vol. 11, no.12, pp.1055-1057.

Воронежский государственный технический университет ОАО «Специализированное конструкторско-технологическое бюро электронных систем», г. Воронеж

DESIGNING OF A CONTROL LOGIC OF 8-BIT, 75 MS/s SAR ADC BY CADENCE EDA

A.V. Strogonov, S.V. Zhigulsky, V.S. Pozhidaev

A 8 bit, 75 MS/s control logic for successive approximation analog-to-digital converter (ADC) synthesized from Verilog HDL code by Cadence EDA tools is presented in this paper

Key words: control logic, ADC, hardware description language Verilog, Cadence

ЦИФРОВОЙ ИНТЕРПОЛИРУЮЩИЙ ФИЛЬТР ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

С.В. Калиниченко, В.П. Литвиненко, В.П. Дубыкин

Рассмотрен принцип интерполяции дискретного сигнала с помощью многокаскадного КИХ-фильтра, представлен пример реализации интерполирующего фильтра на базе ПЛИС и проведено моделирование его работы в пакете Matlab

Ключевые слова: интерполяция, ЦАП, цифровая фильтрация, ПЛИС, Matlab

Применение избыточной дискретизации и цифровой фильтрации позволяют уменьшить требования, предъявляемые к сглаживающим аналоговым фильтрам АЦП и восстанавливающим фильтрам ЦАП. В процессе интерполяции происходит увеличение частоты дискретизации, что приводит к переносу образов спектра дискретизированного сигнала в область более высоких частот, и для восстановления сигнала потребуется аналоговый фильтр меньшего порядка с более широкой переходной областью АЧХ [1].

Кроме того, повышение частоты дискретизации позволяет увеличить отношение сигнал/шум за счет распределения мощности шума квантования в более широкой полосе частот. Поэтому интерполирующие фильтры широко распространены в интегральных схемах быстродействующих ЦАП, используемых в системах беспроводной широкополосной связи, системах с множеством несущих GSM, TDMA, CDMA, системах микроволнового радио, в архитектурах с квадратурной модуляцией, а также в измерительных системах [2].

Увеличение частоты дискретизации в интерполирующем фильтре уменьшает требования к быстродействию устройства формирования полезного сигнала (микроконтроллера, процессора цифровой обработки сигналов), что позволяет уменьшить потребляемую мощность системы, упростить интерфейс передачи цифровых данных на входе ЦАП и снизить стоимость системы.

Известно [3], что двухсторонний спектр $S_{\mathbf{Д}}(f)$ дискретизированного сигнала представляет собой последовательность спектров S(f) исходного сигнала, сдвинутых один относительно другого на частоту дискретизации

 $f_{\rm H} = 2 f_{\rm H'}$ где $f_{\rm H}$ – частота Найквиста, и убывающих по закону

$$A(f) = \frac{\sin\left(\pi \cdot f \cdot \tau_{u}\right)}{\pi \cdot f \cdot \tau_{u}},\tag{1}$$

где 🚛 - интервал дискретизации.

Нормированный спектр амплитуд исходного сигнала с верхней граничной частотой спектра $f_{\rm E} = 0.8 f_{\rm H}$ показан на рис. 1а, а спектр дискретизированного сигнала $S_{\rm A}(f)$ соответственно на рис. 1б (затемненные области). Точечной линией на рис. 1б показана зависимость (1).



Чтобы восстановить сигнал после цифроаналогового преобразования требуется с помощью аналогового восстанавливающего фильтра ослабить боковые лепестки спектра и при необходимости компенсировать частотные искажения спектра в полосе частот исходного сигнала (рис. 1б). Для этого потребуется ФНЧ с узкой переходной областью между полосой пропускания и задерживания с переходным отношением

$$\Pi = \frac{f_s}{f_p} = \frac{f_{\rm A} - f_{\rm B}}{f_{\rm B}} = 1.5,$$
 (2)

где f_{S} - нижняя граничная частота полосы задерживания; f_{p} – верхняя граничная частота полосы пропускания.

Если задаться величиной ослабления сигнала в полосе задерживания $\alpha_{s} \ge 60 \text{ дБ}$, неравномерностью АЧХ в полосе пропускания $\alpha_{p} \le 0.1 \text{ дБ}$, то реализация и настройка аналогового фильтра может стать трудной задачей.

Очевидным решением проблемы является повышение частоты дискретизации сигнала,

Калиниченко Станислав Витальевич - ВГТУ, студент, тел. 8-905-053-73-11

Литвиненко Владимир Петрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 271-44-57

Дубыкин Владимир Прохорович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-951-547-85-34

однако устройство его формирования и обработки сигнала может быть ограничено по быстродействию. Тогда возникает необходимость включения на входе быстродействующего ЦАП интерполирующего фильтра (ИФ), обеспечивающего вставку дополнительных отсчетов в исходный информационный сигнал и, следовательно, увеличение внутренней частоты дискретизации. Отношение выходной частоты дискретизации к входной называют коэффициентом интерполяции К [4].

При прохождении сигнала через фильтр с коэффициентом интерполяции K=2, спектр будет преобразован, как показано на рис. 2. Точечной линией на рис. 2 показана АЧХ цифрового фильтра.



На рис. 2 видно, что цифровой фильтр при K=2 позволяет ослабить образы спектра расположенные на частотах $\pm (2k - 1) f_{\Box}$, а переходное отношение восстанавливающего фильтра составляет

$$\Pi = \frac{f_{s}}{f_{p}} = \frac{2f_{\mathcal{A}} - f_{e}}{f_{e}} = 4.$$
 (3)

Таким образом, применение интерполирующего фильтра позволило существенно снизить требования к аналоговому фильтру на выходе ЦАП. Если коэффициент интерполяции увеличить, то требования к восстанавливающему фильтру можно уменьшить.

Интерполирующие фильтры современных быстродействующие ЦАП имеют структуру, представленную на рис. 3 [2].



Устройство включает в себя три последовательно соединенных фильтра (ИФ1, ИФ2, ИФ3) с коэффициентом интерполяции K=2 и мультиплексор, с помощью которого можно выбрать требуемый коэффициент интерполяции: K = 1 (интерполяция отключена), 2, 4 или 8. Каждый последующий фильтр тактируется с частотой в 2 раза больше предыдущего и обладает большим переходным отношением (меньшим порядком). Для обработки квадратурного сигнала схема, приведенная на рис. 3, дублируется.

Рассмотрим пример реализации такого интерполирующего фильтра. Зададимся величиной ослабления сигнала в полосе задерживания $\alpha_{\rm F} \ge 60$ дБ, неравномерностью АЧХ в полосе пропускания $\alpha_{\rm FP} \le 0.02$ дБ, разрядностью входных и выходных данных n = 16 бит, граничной частотой спектра полезного сигнала $f_{\rm E} = 0.8 f_{\rm H}$.

Как правило, для реализации интерполирующих фильтров применяют КИХ фильтры, поскольку они устойчивы, имеют простую структуру и обладают линейной ФЧХ во всем диапазоне частот. Структура КИХ фильтра может быть упрощена, если часть коэффициентов будет равна нулю или коэффициенты будут повторяться. Эти свойства характерны для полуполосных фильтров ($f_{\mu} = 0.5f_{\rm H}$) с порядком 3+4k [2]. Кроме того, центральный коэффициент полуполосного фильтра всегда равен 0,5, что дает возможность нормировать все остальные коэффициенты относительно него, а центральный отвод без умножения подключить к выходному мультиплексору, как показано на рис.4. Наличие нулевых коэффициентов позволяет использовать полифазную реализацию ИФ, описанную в [5].



Рис. 4

Структурная схема, представленная на рис. 4, соответствует КИХ фильтру, содержащему четыре неповторяющихся коэффициента (фильтр 15 порядка). Для упрощения схемы производится суммирование пар отсчетов, которые умножаются на одинаковый коэффициент. Далее производится умножение и расчет общей суммы. С целью обеспечения высокого быстродействия вычисление сумм и произведений выполняется параллельно, каждая операция выполняется за 1 такт. Мультиплексор на выходе ИФ служит для переключения между задержанным исходным отсчетом и рассчитанным отсчетом. Как видно на рис.5 задержанный исходный отсчет снимается не с центрального (третьего) отвода фильтра, а с седьмого, это связано с тем, что 4 такта требуется на умножение и три операции суммирования.

Для синтеза фильтров ИФ1-ИФ3 была использована программа Filter Solutions. Краткие характеристики полученных фильтров представлены в табл. 1.

		Т	аблица 1
Характеристика	ИФ1	ИФ2	ИФЗ
α_з, дБ	-60.7	-62.2	-68.8
а_р, дБ	0.009	0.008	0.004
П	1.5	4	9
Порядок	39	15	11
Кол-во коэф.	10	4	3
Разр. коэф., бит	12	10	10

Следует отметить, что в табл.1 приводится количество неповторяющихся коэффициентов, неравных нулю.

Для экспериментальной реализации фильтра было решено использовать ПЛИС Spartan XC6LX9 фирмы Xilinx [6], поскольку эта модель распространена и обладает достаточными ресурсами при сравнительно невысокой стоимости. Для проектирования была использована среда ISE, в которой было создано RTLописание фильтров на языке Verilog и проведен синтез. Необходимые числа элементов ПЛИС и максимальные тактовые частоты приведены в табл.2.

		Ta	<u>аблица 2</u>
Характеристика	ИФ1	ИФ2	ИФЗ
Число D-триггеров	986	340	381
Число таблиц поиска	1112	329	297
Макс. <i>f</i> т, МГц	184	211	259

Необходимо отметить, что в табл. 2 «таблицы

поиска» – это ячейки ПЛИС, реализующие любую логическую функцию до шести переменных.

Модель для исследования интерполирующего фильтра в пакете Matlab Simulink представлена на рис. 5.



Она состоит из трех последовательно соединенных интерполирующих фильтров, и блока управления, который служит для формирования тактового сигнала для каждого фильтра в зависимости от требуемого коэффициента интерполяции. Эти блоки выполняют функцию по заданному RTL- описанию. Для согласования инструментов Simulink с поведенческими моделями фильтров используются промежуточные блоки «In» и «Out». На вход первого фильтра подается дискретизированный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в диапазоне частот от 0 до $f_{\rm B} = 0.8 f_{\rm H}$ в виде последовательности 16-битных кодов. Входной сигнал $U_{BX}(t)$ и сигналы $U_{U\Phi}(t)$ на выходе каждого фильтра представлен на рис. 6.



Как видно, при частотах входного сигнала, близких к $f_{\rm E}$, визуально определить входной ЛЧМ сигнал трудно, однако при прохождении через три ИФ количество отсчетов увеличивается в 8 раз, и сигнал принимает форму, близкую к гармонической.

Спектры сигналов представлены на рис. 7. Как видно, восьмикратная интерполяция позволяет выполнить качественное предварительное восстановление сигнала на входе ЦАП и существенно снизить требования к аналоговому фильтру.



Рис. 7

Основными направлением улучшения характеристик фильтра является увеличение быстродействия, поскольку современные системы связи имеют тенденцию к увеличению скорости передачи информации и расширению полосы используемых частот. Увеличение быстродействия возможно путем применения параллельных вычислений, а также путем организации сложного вычислительного конвейера. С другой стороны, увеличение скорости может быть достигнуто путем реализации фильтра в составе специализированной СБИС.

Литература

1. MT-017: Oversampling Interpolating DACs URL: http://www.analog.com/media/ru/training-semnars/tutorials/ MT-017.pdf (дата обращения: 01.03.2016)

2. AD9777 16-Bit, 160 MSPS 2×/4×/8× Interpolating Dual TxDAC+® D/A Converter Data Sheet (Rev. C) URL: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/da ta-sheets/AD9777.pdf (дата обращения: 01.03.2016).

3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И.С. Гоноровский. - М.: Дрофа, 2006. - 719 с.

4. Микушин А.В. Цифровые устройства и микропроцессоры [Текст] / А.В. Микушин, А.М. Сажнев, В.И. Сединин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. - 832 с.

 Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
 Xilinx's Product specification: Spartan-6 Family

Overview DS160 (v2.0) October 25, 2011.

Воронежский государственный технический университет

DIGITAL INTERPOLATING FILTER FOR HIGH SPEED DIGITAL TO ANALOG CONVERTER

S.V. Kalinichenko, V.P. Litvinenko, V.P. Dubykin

The method of interpolation of discrete signals using multistage FIR filter is examined. The example of interpolating filter design on FPGA is realized and simulated in Matlab

Key words: interpolation, DAC, digital filtering, FPGA, Matlab

КОЛЬЦЕВОЙ МОНОБЛОЧНЫЙ ГИРОСКОП С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ: ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ СЪЕМА ВЫХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Н.А. Ус, С.П. Задорожний, А.А. Авершин

Представлены результаты исследования возможности формирования динамической интерференционной картины на выходе лазерного гироскопа с треугольной оптической схемой, реализующего эффект Саньяка. Предметом исследования является оригинальная конструктивно-технологическая схема оптического интерференционного смесителя. Обоснованы требования к изготовлению смесителя. Представлены сравнительные оценки параметров нового датчика и его аналога – кольцевого газового лазерного гироскопа

Ключевые слова: эффект Саньяка, оптический гироскоп, интерференционный смеситель

Введение

В существующих лазерного системах гироскопа реализации динамической для интерференционной картины на его выходе применяются различные конструктивнотехнологические решения интерференционных смесителей. Распространение получили три зеркальные, призменные и основные схемы: Они голографические [1]. отличаются определенной сложностью и ориентированы для конкретных типов оптических кольцевых систем. Применительно к моноблочным конструкциям лазерных гироскопов получили распространение призменные оптические системы смесителей, которые являются универсальными лпя оптического контура с любым количеством граней.

В конструктивно-технологическом плане призменный смеситель состоит из полупрозрачного зеркала с коэффициентом пропускания не более 10% и совмещенной с ним прямоугольной призмы специальной конструкции. Ее отличие состоит в том, что ее базовый угол при вершине призмы составляет величину 90⁰+0. Величина угла θ может составлять до 2 минут и определяет параметры интерференционной картины устройства в зоне экрана.

Недостатком такого смесителя является сложность технологии его изготовления. Кроме того, отрицательное влияние температуры на такой сэндвич очевидно. Это может быть определяющим для высокостабильных навигационных систем.

В работе проведены исследования ПО созданию интерференционного смесителя интегрированного типа для кольцевого моноблочного гироскопа с треугольной оптической схемой и применением в качестве источника оптического излучения микромощного полупроводникового лазерного диода.

Задорожний Сергей Павлович – ВУНЦ ВВС «ВВА», старший преподаватель, тел. 8(920)404-42-22

В целом кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом представляет новую группу устройств в общей группе кольцевых газовых лазерных гироскопов и волоконно-оптических гироскопов [2].

1. Оптическая схема формирования интерферометрической картины

Отличительными признаками кольцевого моноблочного гироскопа с полупроводниковым лазерным диодом (КМГ) являются: наличие в качестве основы устройства моноблока с открытыми оптическими каналами, которые формируются, например, в заготовке ИЗ органического стекла; оригинальный оптический резонатор, формирующий двунаправленный оптический луч от полупроводникового лазерного диода; полупроводниковый лазерный диод в качестве источника оптического излучения [2,3]. Экспериментальный вариант КМГ лазерного гироскопа с треугольной оптической схемой имеет оригинальный дополнительно оптический интерференционный смеситель [4], совмещенный с юстировочным устройством (рис.1). Оптический контур устройства в моноблоке 1 в качестве обвязки содержит два зеркала полного отражения 2 оригинальный оптический смеситель 3. И Используемая оптическая схема гироскопа и его обвязка облегчают операцию юстировки системы гироскопа И несколько повышают его температурную стабильность, так как относительно точечного источника нагрева (микромощного полупроводникового лазера) конструкция обладает симметричностью. Этим достигается соразмерность изменения геометрии оптических каналов моноблока. Заметим, что для отвода части энергии оптического луча из оптического контура оптический смеситель должен пропускать на выход более не 10%. обеспечивая гироскопа энергетическую стабильность режима оптического контура.

Конструкция оптического смесителя и принцип его работы, представлены на рис.2.

Ус Николай Александрович – ВУНЦ ВВС «ВВА», д-р техн. наук, профессор, e-mail: <u>UNA.2012@yandex.ru</u>

Авершин Александр Александрович – ВУНЦ ВВС «ВВА», адъюнкт, тел. 8(910)746-63-47



Рис. 1. Бета-образец КМГ лазерного гироскопа с треугольной оптической схемой

Оптический смеситель в конструкции гироскопа должен выполнять следующие функции: замыкание оптического контура гироскопа, юстировку оптических лучей с целью устранения несоосности оптических каналов, формирование интерференционной картины на выходе прибора.

Оптический смеситель в конструктивном плане представляет собой плоско-параллельную стеклянную призму заданной толщины Н. Величина Н определяет зону экрана L для формируемой интерференционной картины. В ее центре на рабочей поверхности создана вогнутая полусферическая область радиусом R, поверхность которой покрыта полупрозрачным отражающим слоем для рабочей длины волны гироскопа. При этом полусферическая поверхность смесителя позволяет реализовать юстировку оптической системы гироскопа.

Учитывая, что правый и левый оптические лучи приходят к вершине треугольного моноблока с оптическим смесителем под одинаковыми углами $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^{\circ}$, на границе раздела «стекловоздух» при выходе оптического сигнала через полупрозрачное стекло смесителя эффект полного отражения не наблюдается (рис.2). Если толщину этого зеркала H увеличить с учетом рабочей длины волны λ , то угол расходимости β лучей после границы зеркала будет достаточно мал.

Это приведет к тому, что область перекрытия интерференции И волн в зоне экрана/фотоприемника будет достаточно мала. Как положительный момент следует отметить, что равенство оптических путей правого и левого обеспечивает практически оптимальные условия по интенсивности света в зоне перекрытия волн. Если принять $I_1 = I_2 = I_0$, то получим условие интенсивности обоих интерферирующих волн:

$$\begin{cases} I_{max} = 4I_0 \\ I_{min} = 0 \end{cases}$$
(1)

Для увеличения этой области необходимо увеличивать рабочую зону *L* фотоприемника/экрана. Но тут возникает противоречие, которое связано с дополнительным уменьшением интенсивности света на фотоприемнике.

Работа фотоприемника на удалении более 5 см от выходной фронтальной плоскости зеркала приводит к повышенному уроню шумов фотоприемника, что также нежелательно. Теория показывает, что расстояние между соседними интерференционными полосами (светлыми или темными) определяется как период следования полос известным выражением [6]:

$$\Delta = \lambda L/d, \qquad (2)$$

Здесь d – расстояние между точками выхода лучей из полупрозрачного зеркала.

Из приведенного выражения следует, что период следования интерференционных полос зависит от рабочей длины полупроводникового лазера. При этом на оси полупрозрачного зеркала контраст интерференционных полос будет максимальным, а к периферии будет уменьшаться.



Рис. 2. Интерференционная картина на выходе полусферического зеркала моноблочной треугольной оптической системы лазерного гироскопа

Оценки в выражении показывают, что при рабочей длине волны 1,0 мкм, толщине полусферического зеркала не более 10 мм и удалении фотоприемника не более 5 мм период следования интерференционных полос составляет порядка 0.3...0,6 мм.

В качестве замечаний следует отметить, что для четырехугольной оптической схемы моноблока данные рассуждения не приемлемы, так как лучи приходят в точки переотражения контура зеркал под углом 45°. При этом на границе системы «стекло-воздух» происходит появление угла полного отражения при выходе из полупрозрачного плоскопараллельного зеркала. Выходной информационный сигнал в этом случае практически отсутствует.

2. Обработка динамической интерференционной картины

Обеспечить разрешающую способность для такого периода следования интерференционных можно. например, увеличив попос длину L расстояния ло экрана или применив фотоприемное устройство специальной топологии с уменьшенным расстоянием между рабочими фотоприемными областями.

Выполненные исследования показывают, что для треугольных моноблочных оптических систем лазерных гироскопов возможно упрощение оптической схемы за счет учета возможностей современной микроэлектронной базы фотоприемных устройств, в частности, применения дифференциальных фотоприемных диодов, в которых расстояние между двумя соседними фотоприемными областями составляет 10...30 мкм.

Техническое решение разработанного устройства обработки динамической для интерференционной картины раскрывает структурная схема на рис.3. Устройство содержит: 1- оптический резонатор; 2 - интерференционный оптический смеситель; 3 – фокусирующую линзу; 4 дифференциальные фотодиоды; 5 – два усилителя; 6 – два формирователя счетных импульсов; 7 - систему определения знака угловой скорости; 8 – реверсивный счетчик.

Дифференциальные фотодиоды 4 [7] отличаются своими электрическими и оптическими характеристиками, которые определяются

конструктивно-технологическим решением изделия – объединением двух фотодиодов интегрального типа в одном кармане без разделительной области между ними и минимальными топологическими размерами. Данные линейные размеры могут составлять 5-15 мкм и даже меньше. Это приводит к тому, что соседние фотоприемные области относительно подложки образуют двунаправленный латеральный транзистор, включенный по схеме с общей базой. При этом, сфокусированная линзой 3 интерференционная картина плоскости дифференциальных в фотодиодов при ее обработке не потребует жестких ограничений разнесение на их апертур относительно оптической оси интерференционного оптического смесителя. Задача уже решена на конструктивном уровне в дифференциальных фотодиодах.

Данное изделие выпускается электронной промышленностью, как в РФ, так и за рубежом. В отечественной технической литературе фотодиоды такой конструкции получили название «двухплощадные фотодиоды» [8]. Однако, содержательная предлагаемого часть лля применения устройстве фотоприемного В устройства имеет принципиальные отличие в конструктивно-топологическом плане И соответствует названию «дифференциальные Поэтому данной фотодиоды». В работе используется данный термин в определении понятия специальное фотоприемное устройство.



Рис. 3. Структурная схема устройства обработки динамической интерференционной картины на базе дифференциальной пары фотоприемников

Устройство обработки динамической интерференционной картины работает следующим образом.

<u>Состояние объекта:</u> отсутствие углового вращения лазерного гироскопа.

Оптический резонатор 1 находится в состоянии равновесия. В контуре циркулируют в противоположных направлениях электромагнитные поля полупроводникового лазерного диода. В оптическом резонаторе устанавливается система стоячих волн. На выходе интерференционного оптического смесителя имеет место статическая интерференционная картина, т.е. интерференционные полосы не перемещаются относительно оптической оси интерференционного оптического смесителя.

При наличии синхроимпульса схема цифровой обработки определяет, что перемещение интерференционных полос отсутствует по причине отсутствия изменения фототока в непи дифференциальных фотодиодов 4 и выходного сигнала усилителей 5. Схема цифровой обработки определяет, что перемещение интерференционных полос отсутствует, так как система определения знака угловой скорости 7 не фиксирует изменения направления углового перемещения гироскопа, а код реверсивного счетчика 8 определяет угловую скорость равную нулю.

<u>Состояние объекта:</u> наличие правого (по часовой стрелке) углового вращения лазерного гироскопа со скоростью Ω(t).

Оптический резонатор 1 выведен из состояния равновесия. В контуре циркулируют противоположных направлениях электромагнитные поля полупроводникового лазерного диода. Однако в оптическом резонаторе система стоячих волн приходит в движение из-за появления набега фазы, обусловленного эффектом Саньяка. На выходе интерференционного оптического смесителя 2 имеет место динамическая интерференционная интерференционные картина. т.е. полосы перемещаются в право (по часовой стрелке) относительно оптической оси интерференционного оптического смесителя пропорционально угловой скорости вращения гироскопа $\Omega(t)$.

При наличии синхроимпульса схема цифровой обработки определяет, что имеет место правое (по часовой стрелке) перемещение интерференционных полос по причине наличия фототока сначала в цепи фотодиодов 4.2, затем 4.1, выходного сигнала сначала в цепи усилителя 5.2, а потом и в цепи усилителя 5.1. Система определения угловой скорости 7, приняв знака от формирователя счетных импульсов 6.2 импульс направления/знака угловой скорости лазерного гироскопа, формирует соответствующий управляющий сигнал на реверсивный счетчик 8. Реверсивный 8 счетчик начинает считать информационные импульсы, сформированные каналом цифровой обработки от фотоприемника 42 Счет продолжается в соответствии С разрешенным временем, задаваемым синхроимпульсом. Код реверсивного счетчика 8 определяет направление и осредненную угловую скорость лазерного гироскопа за период разрешенного счета от синхроимпульса.

Учитывая, что фотоприемник 4 реализован с дифференциальных фотодиодов, помошью достаточно последний расположить относительно оптической оси интерференционного оптического смесителя без дополнительной взаимной юстировки относительно соседних интерференционных полос. Дифференциальный фоторежим обеспечит более точное и быстрое срабатывание фотодиодной пары на динамику интерференционной картины лазерного гироскопа.

Использование разработанного устройства позволяет модифицировать известные лазерные гироскопы на базе кольцевых лазерных схем для навигационных систем объектов с целью повышения их точностных характеристик отсчета измеряемых угловых скоростей и сохранении базисных параметров в качестве датчиков угловых скоростей.

Выводы

В работе развивается подход реализации эффекта Саньяка, на базе которого гироскопический датчик строится на основе оптического кольцевого резонатора, а элементом накачки – является полупроводниковый лазерный диод. Новизна технических решений подтверждена соответствующими патентами РФ.

В результате выполненных научных исследований получены следующие результаты:

1. Анализ оптической интерферометрии в технике навигационных систем позволил выявить новые конструктивно-технологические посылки развития лазерных гироскопов на базе кольцевых моноблочных структур. B качестве конструкционного материала предложено органическое стекло, что существенно упрощает технологию производства и себестоимость изделия. Создан опытный образец КМГ с треугольной оптической схемой И полупроводниковым лазерным диодом.

2 Разработана конструкция интерферометрического смесителя гироскопа с кольцевой треугольной оптической схемой и схема обработки формируемой динамической интерферометрической картины на базе дифференциального фотодиода, новизна технического решения которого подтверждена положительным решением патентного ведомства PΦ.

Литература

1. Байбородин, Ю.В. Основы лазерной техники [Текст] / Ю.В. Байбородин. – 2-е изд., перераб. и доп. -Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1988. – 388 с.

2. Ус, Н.А. Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом-базовый элемент бесплатформенной инерциальной навигационной системы [Текст] / Н.А. Ус, С.П. Задорожний // Вестник военно-воздушной академии. Периодическое издание Военно-воздушной академии имени профессора Н.Е. Жуковского и А.Ю. Гагарина (г. Воронеж) – Вып.1(20).– Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014.– С. 184-190.

3. Лазерный гироскоп: пат. 2488773 Российская Федерация, МПК G 01С 19/66. [Текст] / Н.А.Ус; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) (RU). – №2011144273; заявл. 01.07.2011; опубл. 27.07.2013, Бюл. № 21. – 10 с.: ил.

4. Лазерный гироскоп: пат. 2507482 Российская Федерация, МПК G 01С 19/66. [Текст] / Н.А.Ус; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) (RU). – №2011152926/28; заявл. 23.12.2011; опубл.20.02.14 Бюл.№5 – 10 с.: ил.

5. Оптический интерференционный смеситель лазерного гироскопа: решение о выдаче патента РФ от 13.01.2016, МПК G01J 9/02, G 01C 19/64. [Текст] / Н.А.Ус, С.П. Задорожний, О.Н. Склярова, А.А. Авершин; заявитель и патентообладатель ФГКВОУ ВПО ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) (RU) - №2014154356/28(086919) от 30.12.2014.

6. Голубенцева Л.И. Изучение эффекта проявления пространственной когерентности света в интерференционной схеме Юнга: руководство к лабораторным работам по курсу общей физики [Текст] / Л.И. Голубенцева, О.А. Перепелицин, В.П. Рябухо. Под ред. проф. В.П. Рябухо. – Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2006. – 20с.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

RING MONOBLOCK GYRO WITH SEMICONDUCTOR LASER DIODE: FEATURES OF THE RETRIEVAL SYSTEM OUTPUT INFORMATION

N.A. Us, S.P. Zadorozhny, A.A. Avershin

Presents the results of research into the formation of dynamic interference pattern at the output of the laser gyro with a triangular optical system that implements the Sagnac effect. The research is original constructive and technological scheme of the optical interference mixer. Justified requirements for the construction of the mixer. Presents comparative estimates of the parameters of the new sensor and its analog – gas ring laser gyroscope

Key words: Sagnac effect, the optical gyro, mixer interference

СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫЕ СИГНАЛЫ С НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ

С.В. Дворников, С.С. Дворников, С.С. Манаенко, А.В. Пшеничников

В статье представляются материалы по исследованию сигналов с плавным изменением фазы для передачи дискретной информации. Обосновываются процедуры синтеза таких сигналов. Рассматривается их спектральная эффективность и анализируются результаты компьютерного моделирования

Ключевые слова: фазовая модуляция, спектральная эффективность, передача дискретной информации

Введение

Продуктивное развитие систем связи невозможно без наличия спектрально-эффективных сигналов, обеспечивающих передачу информации с требуемым качеством. Особенно остро эта проблема стоит перед специалистами систем радиосвязи, работающих с каналами, имеющих достаточно сильно ограниченный частотный ресурс. К тому же, радиоканалы подвержены воздействию шумов и помех различной природы, которые негативно влияют на качество передаваемой по ним информации. Следовательно, разработка сигнальных конструкций, устойчивых к воздействию деструктивных факторов и при этом обладающих достаточно высокой спектральной эффективностью, является актуальной задачей для специалистов в области радиосвязи.

Согласно [1], к основным показателям, характеризующим тот или иной модуляционный формат, следует отнести помехоустойчивость и спектральную эффективность, под которой понимают полосу частот, необходимую для передачи сигналов с требуемой скоростью и достоверностью.

В общем случае, данные показатели тесно взаимосвязаны между собой. Это приводит к тому, что улучшение одного из них невозможно без снижения качества другого. Между тем, переход на цифровые системы передачи информации во многом предопределил типы используемых модуляционных форматов, к которым, в первую очередь, следует отнести различные виды манипуляций, как наиболее полно соответствующих дискретной природе передаваемой битовой информации.

Однако, возможности широко известных форматов манипуляции фактически исчерпаны, а их дальнейшая модернизация не позволяет получить существенного выигрыша. В связи с этим, в последнее время наметилась тенденция на переход к формированию сигналов в базисах, отличных от гармонических [2, 3]. В частности, вейвлет-базисы, базисы сплайн-характеров и др [4, 5]. Однако такой подход предполагает полную замену приемопередающего оборудования, что сложно осуществить в существующих реалиях. Между тем, по мнению зарубежных специалистов [4, 5, 6], традиционные виды модуляции еще до конца не исчерпали свои возможности, и даже в рамках неизбежного перехода к методам цифровой обработки сигналов, требуют дополнительного переосмысления.

В связи с указанными обстоятельствами, в настоящей статье рассматриваются подходы к формированию сигналов с плавным изменением фазы, которые могут быть использованы для передачи дискретной информации. Такой подход, по мнению авторов, позволит формировать спектральноэффективные конструкции, характерные для сигналов с плавно изменяющимися параметрами, при этом обладающих помехоустойчивостью, свойственной дискретно-манипулированным сигналам.

Анализ предельных свойств сигнальных конструкций

Как правило, выбор сигнальной конструкции осуществляется исходя из требований, предъявляемых к достоверности и скорости или объему передаваемой информации, а также возможностей предоставляемого для этого радиоканала.

В свою очередь, скорость или объем передаваемой информации определяется пропускной способностью, которая характеризует количество достоверно передаваемой информации в единицу времени.

Согласно [7], верхняя граница пропускной способности C (бит/с) определяется отношением средней мощности сигнала P_c к средней мощности

шума $N_{\rm m}$ ($h^2 = P_{\rm c}/N_{\rm m}$) и полосой пропускания в радиоканале ΔF (Гц).

В результате, для систем передачи дискретной информации пропускная способность характеризуется в соответствии с теоремой Шеннона следующим выражением [7]:

$$C = \Delta F \cdot \log_2(1+h^2) \tag{1}$$

Основание логарифма в формуле (1) указывает на дискретный характер передаваемой информации, т.е. предполагает два состояния, в общем случае, основание логарифма может быть любым целым числом.

Учитывая, что мощность шума определяется полосой пропускания, то для канала с полосой ΔF можно записать

Дворников Сергей Викторович – ВАС, д-р техн. наук, профессор, тел. 8-905-275-50-02, e-mail: practicdsv@yandex.ru Дворников Сергей Сергеевич - ВАС, техник лаборатории, тел. 8-905-275-50-02, e-mail: practicdsv@yandex.ru Манаенко Сергей Сергеевич - ВАС, канд. техн. наук, старший преподаватель, тел. 8-911-121-93-80, e-mail: manaenkoss@mail.ru Пшеничников Александр Викторович - ВАС, канд. техн. наук, доцент, тел. 8-911-013-39-70, e-mail: siracooz77@mail.ru

$$N_{\rm III} = N_0 \Delta F$$
 ,

где N₀ – спектральная плотность мощности шума.

На практике часто используют сложные сигнальные конструкции, в которых одним символам переносится несколько битов информации, поэтому для обеспечения возможности сравнения по показателю помехоустойчивости различных систем передачи информации в [7] предложено использовать такой показатель, как отношение сигнал/шум (ОСШ), приходящийся на бит, который можно представит следующим образом:

$$h_0^2 = E_b / N_0 \,, \tag{2}$$

где E_b – энергия, приходящаяся на бит.

Выражение (2) довольно полно характеризует энергетические характеристики каналов систем передачи информации.

Величина h_0^2 связана с h^2 следующим соотношением:

$$h_0^2 = h^2 \frac{\Delta F}{R} \,, \tag{3}$$

где *R* – скорость передачи информации в канале.

Пропотенцировав формулу (1), с учетом (2), можно получить более удобное выражение для характеристики каналов:

$$h_0^2 = \frac{1}{C/\Delta F} \cdot \left(2^{C/\Delta F} - 1\right). \tag{4}$$

Фактически, выражение (4) характеризует зависимость отношения пропускной способности к доступной полосе частот от энергетической характеристики канала. Так, на рис. 1 показа графическая интерпретация выражения (4).

Таким образом, количество информации, соответственно, скорость передачи информации зависит от качества канала, определяемого его текущим значением ОСШ. Чем выше значение h_0^2 , тем, следовательно, можно больше передать информации в одной и той же полосе частот. Или же, чем хуже качество канала, тем ниже в нем скорость передачи информации.





Кривая на рис. 1 определяет область предельных допустимых значений передачи информации для любых сигнальных конструкций. Учитывая, что на практике величина R всегда меньше C, то значение $h_0^2 \approx -1.6$ дБ, называемое пределом Шеннона [7], определяет предельное допустимое качество канала, при котором $R \rightarrow 0$, т.е. передача информации становится невозможной в принципе. Как уже указывалось, другим показателем, характеризующим каналы системы передачи информации, является достоверность, количественно определяемая, как вероятность ошибки на бит P_b . Данный показатель зависит от вида модуляции. И в [4] определен для сигналов двоичной фазовой манипуляции (ФМн-2)

$$P_b^{\Phi M_{\rm H2}} = Q(\sqrt{2} h_0^2), \qquad (5)$$

а для сигналов двоичной частотной манипуляции (ЧМн-2)

$$P_b^{\rm q_{MH2}} = Q(h_0^2), \qquad (6)$$

где
$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z}^{\infty} e^{-t^{2}/2} dt - гауссова функция [8].$$

Именно условие допустимой ошибки в канале системы передачи информации позволяет на практике перейти от показателя пропускной способности C к скорости передачи R, при заданном уровне битовой ошибки P_b . На рис. 2 показаны зависимости вероятности ошибки на бит для сигналов ЧМн-2 и ФМн-2 от ОСШ. Учитывая взаимосвязь рассматриваемых показателей, предлагается их рассматривать на плоскости единого информационного пространства, представленного на рис. 3.



Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки в канале от ОСШ

Предложенный подход позволят оперативно оценить энергетический и частотный ресурс канала. В частности, для примера на рис. З пунктиром нанесены значения для спектральной эффективности в точке D равной $\approx 5,5$ (бит/с/Гц), которая может быть обеспечена при ОСШ $\approx 9,5$ дБ. Причем, использование в канале сигналов ФМн-2 (A), позволит более чем на порядок снизить вероятность битовой ошибки, по сравнению с каналом, в котором используются сигналы с ЧМн-2.



Рис. 3. Информационная плоскость эффективности, взаимно увязывающая показатели помехоустойчивости и спектральной эффективности различных видов модуляции

В результате, комплексное понятие эффективности для первого канала можно охарактеризовать длиной условного отрезка *BD*, а второго, соответственно, *AD*. Таким образом, использование предложенной информационной плоскости эффективности, позволяет перейти к геометрической интерпретации процедур сравнения каналов различных систем передачи информации.

Заметим, что повышению скорости передачи информации в канале способствует увеличение позиционности модуляционного формата, однако при этом возрастает битовая ошибка. В результате условная длина отрезка, характеризующая такой канал на информационной плоскости эффективности, останется неизменной, что подчеркивает удобство ее использования для качественного сравнения различных систем передачи информации. Только в этом случае по правой оси абсцисс целесообразно откладывать реально обеспечиваемую скорость передачи.

В настоящее время компромиссным решением для систем передачи информации по радиоканалу является использование модуляционных форматов на основе ФМн-2 и ФМн-4 [5]. Именно поэтому указанные виды модуляции рассматривать в качестве основы для формирования сигналов с плавным изменением фазы при передаче дискретной информации.

Формирование сигналов с плавным изменением фазы при передаче дискретной информации

В [3] обосновывается, что синтез сигналов ФМн-2 и ФМн-4 представляет собой последовательную конкатенацию радиоимпульсов с соответствующими значениями параметров, а именно, значениями начальной фазы, определяемой значениями информационных символов. Таким образом, результирующие излучение является комбинацией радиоимпульсов. Следовательно, его спектр будут иметь значительное число компонентов, свойственных последовательности импульсов, которые не отражают информационное наполнение манипулированного сигнала, но существенно ухудшают его частотные характеристики.

В тоже время, сигналы фазовой модуляции (ФМ), модулированные гармоническим колебанием, лишены указанных недостатков [4]. В связи с этим, рассмотрим более подробно их синтез.

В общем случае, согласно [6], модуляцией называется изменение по закону модулирующего сигнала (информационного сообщения) во времени одного из параметров гармонического колебания вида:

$$s(t) = U_m \cos(\varphi(t)), \qquad (7)$$

где U_m – амплитудный параметр несущего колебания; $\varphi(t)$ – фазовый (угловой) параметр несущего колебания.

Так, в отсутствие модуляции мгновенная фаза $\varphi(t)$ изменяется с постоянной скоростью $\omega_{\rm H} = 2\pi f_{\rm H}$ (здесь $f_{\rm H}$ – частота несущего колебания) и является линейной функцией времени

$$\varphi(t) = \omega_{\rm H} t + \varphi_0 \ . \tag{8}$$

Именно процесс модуляции полной фазы $\varphi(t)$

(учитывается начальное значение фазы ϕ_0 в (8)) модулирующим сигналом $u_{\Omega}(t)$ за счет изменения мгновенной фазы называется *фазовой модуляцией* [5-7].

При модуляции линейность изменения полной фазы $\varphi(t)$ нарушается, и в каждый момент времени t скорость изменения мгновенной фазы будет определяться мгновенной частотой. В [6] обосновано, что мгновенная фаза и мгновенная частота связаны между собой следующими соотношениями

$$\omega(t) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \varphi(t); \quad \varphi(t) = \int_{0}^{t} \omega(t) \,\mathrm{d}t \,. \tag{9}$$

Из выражений (9) следует, что изменение фазы колебания по закону $\varphi(t)$ вызывает изменение мгновенной частоты по закону производной от фазы, а изменение мгновенной частоты по закону $\omega(t)$ приводит к изменению фазы по закону интеграла от мгновенной частоты.

Таким образом, сигнал ФМ получается путем приращения начальной фазы $\Delta \varphi(t)$ колебания (8), пропорционального модулирующему сигналу $u_{\Omega}(t)$. В результате полная фаза $\varphi(t)$ принимает вид:

 $\varphi(t) = \omega_{\mu}t + \varphi_0 + \Delta\varphi(t) = \omega_{\mu}t + \varphi_0 + \alpha u_{\Omega}(t) \quad (10)$

Если модулирующий сигнал $u_{\Omega}(t)$ является гармоническим колебанием, то с увеличением его значений полная фаза фазомодулированного колебания будет возрастать быстрее, чем по линейному

закону. В то же время при уменьшении значения модулирующего сигнала происходит спад скорости роста $\varphi(t)$ во времени. В [6] максимальное отклонение фазы $\Delta\varphi(t)$ от первоначального ее значения определено как девиация частоты.

Аналитически процесс формирования сигналов ФМ можно представить, подставив значение (10) в выражение (7)

$$s_{\Phi M}(t) = U_m \cos[\omega_{_H}t + \varphi_0 + \alpha u_{\Omega}(t)]. \quad (11)$$

В (11) величина $\alpha u_{\Omega}(t) = \Delta \varphi(t)$ представляет девиацию, т.е. отклонение фазы модулированного сигнала от линейного закона, согласно которому первоначально происходило изменение несущего колебания.

В [9] значение девиации определено как

$$\Delta \varphi(t)_{\text{max}} = \alpha \left| u_{\Omega}(t)_{\text{max}} \right| = m_{\Phi M} .$$
 (12)

В выражении (12) значение $m_{\Phi M}$, характеризующее максимальное отклонение фазы, называется индексом фазовой модуляции.

Важным моментом является то, что если модуляция осуществляется гармоническим колебанием (тональная модуляция) $u_{\Omega}(t) = U_{\Omega} \cos{(\Omega t)}$, то аналитическую запись такого сигнала можно представить как

$$s_{\Phi M}(t) = U_m \cos[\omega_n t + \varphi_0 + \alpha U_\Omega \cos(\Omega t)] =$$

= $U_m \cos[\omega_n t + \varphi_0 + m_{\Phi M} \cos(\Omega t)].$ (13)

Величина $m_{\Phi M} = \alpha U_{\Omega}$ в (13) пропорциональна амплитуде модулирующего колебания. Анализ аналитической модели сигнала ФМ (11) показывает, что она является обобщающей по отношению к сигналам ФМн, в которых в качестве модулирующего сигнала $u_{\Omega}(t)$, выступает некоторая дискретная функция

$$I(t) = \begin{cases} \pi & \text{если "1";} \\ 0 & \text{если "0".} \end{cases}$$
(14)

Смена значений в (14) определяется скоростью передачи информации.

Следовательно, подставив (14) в (11) получим сигнал, дискретность которого определяет скорость изменения параметра I(t).

Между тем, для исключения дискретных разрывов модулированного колебания $s_{\Phi M}(t)$ предлагается дискретной функцией I(t) модулировать модулирующее колебание $u_{\Omega}(t)$. В результате чего получим

$$\widehat{u}_{\Omega}(t) = U_{\Omega} \cos\left(\Omega t + I(t)\right).$$
(15)

И лишь затем модулирующим сигналом (15) модулировать искомое колебание (13) (знак $\hat{*}$ указывает на дискретный характер модулирующего колебания).

Искомый сигнал целесообразно представить в терминах выражения (13)

$$s_{\Phi M}(t) = U_m \cos[\omega_n t + \varphi_0 + \hat{u}_{\Omega}(t)] =$$

= $U_m \cos[\omega_n t + \varphi_0 + \hat{m}_{\Phi M} \cos(\Omega t)].$ (16)

В результате указанных процедур получаем сигнал ФМ, в котором индекс $\hat{m}_{\Phi M}$ будет безразрывности изменяться по закону $\cos(\Omega t)$ в интервале от 0 до π .

Таким образом, непрерывное колебание (16), обеспечивает перенос дискретной информации.

Для удобства определим полученный, в соответствии с предложенным выше подходом колебание, как фаза-дискретно-непрерывный (ФДН) сигнал.

Обоснование значения индекса модуляции для фаза-дискретно-непрерывных сигналов

Важным моментом синтеза ФДН сигналов является выбор значения индекса модуляции $\hat{m}_{\Phi M}$. В [8] показано, что функции вида (16) могут быть представлены в виде суммы гармоник, умноженных на функции Бесселя:

$$\cos(\alpha + X\cos\beta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(X)\cos\left(\alpha + n\beta + \frac{n\pi}{2}\right), (17)$$

где $J_n(X)$ есть функции Бесселя первого рода *n*-го порядка от аргумента X, которые являются решениями дифференциального уравнения вида:

$$x^{2} \frac{d^{2} y}{dx^{2}} + x \frac{d y}{dx} + (x^{2} - n^{2}) y = 0.$$
 (18)

Анализ выражения (17) показывает, что коэффициенты спектрального разложения функции (16) в базисе гармоник (17) будут определяться амплитудным значениям функции Бесселя соответствующего порядка.

Для оценки вклада, каждой из составляющих спектра (17), на рис. 4 представлены функции Бесселя первых 6 порядков.



импульсов

Преобразуем выражение (16) в соответствии с формулой (17):

$$s_{\Phi M}(t) = U_m \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\hat{m}_{\Phi M}) \cos\left(\omega_n t + n\Omega t + \frac{n\pi}{2}\right).$$
(19)

Далее, раскрывая выражение (19) для первых коэффициентов, получим:

$$s_{\Phi M}(t) = U_m \{J_0(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \omega_{\mu} t + J_1(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t + \frac{\pi}{2}\right] + J_{-1}(\hat{m}_{\Phi M}) + \cos \left[(\omega_{\mu} - \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t - \frac{\pi}{2}\right] + J_2(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left$$

$$+2\Omega t + \frac{2\pi}{2} + J_{-2}(\hat{m}_{\Phi M}) \cos\left[(\omega_{H} - 2\Omega)t - \frac{2\pi}{2}\right] + ... \right\} (20)$$

Учитывая справедливость равенства для функций Бесселя [9]

$$J_{-n}(X) = (-1)^{n} J_{n}(X) .$$
(21)
Формулу (21) можно преобразовать к виду
 $s_{\Phi M}(t) = U_{m} \{J_{0}(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \omega_{\mu} t + J_{1}(\hat{m}_{\Phi M}) \times \\ \times \cos \left[(\omega_{\mu} + \Omega)t + \frac{\pi}{2} \right] - J_{1}(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} - \Omega)t - \frac{\pi}{2} \right] + \\ + J_{2}(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} + 2\Omega)t + \frac{2\pi}{2} \right] + \\ + J_{2}(\hat{m}_{\Phi M}) \cos \left[(\omega_{\mu} - 2\Omega)t - \frac{2\pi}{2} \right] + ... \}$ (22)

Анализ выражения (22) показывает, что модуляция сигнала гармоникой приводит к появлению боковых частот, отстоящих от несущей на расстояниях, кратных частоте модуляции. Относительные амплитуды боковых компонент будут определяться коэффициентами $J_1(\hat{m}_{\rm ФM})$, $J_2(\hat{m}_{\rm ФM})$ и т.д.

В [9] отмечено, что боковые составляющие довольно быстро убывают при малых значениях индекса фазовой модуляции, т.е. при $\hat{m}_{\Phi M} < 1$. Для больших значений $\hat{m}_{\Phi M} > 1$, амплитудные значения функций Бесселя существенно меняются только при n = X, т.е. когда номер порядка равен значению аргумента.

Между тем, анализ результатов, представленных на рис. 3, показывает, что распределение энергии на каждую из составляющих функции Бесселя является неравномерным и при $\hat{m}_{\rm ФM} < 1$, большая часть энергии будет приходиться на несущую частоту, которая не содержит в себе информацию модулирующего сигнала. Очевиден выбор значения такого значения $\hat{m}_{\rm ФM}$, при котором доминирующая часть энергии была бы сосредоточена именно в боковых составляющих. Таковыми, согласно рис. 4, для функций Бесселя являются значения X = 2,405 и X = 5,52.

Для оценки спектральной эффективности ФДН сигналов вычислим среднюю мощность сигнала (16) приняв $\phi_0 = 0$

$$P_{\rm cp} = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (U_m \cos[\omega_n t + \widehat{m}_{\Phi M} \cos(\Omega t)])^2 dt =$$

= $\lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{U_m^2}{2} dt + \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \frac{U_m^2}{2} \cos[2\omega_n t + 2\widehat{m}_{\Phi M} \cos(\Omega t)] dt.$ (23)

Заметим, что подынтегральное выражение первой части (23) не зависит от переменной интегрирования, а для второй части с ростом значения *T* результат усреднения стремится к нулю. Следова-

тельно,
$$P_{\rm cp} = \frac{U_m^2}{2}$$

Если же в спектральном представлении (19) ограничить количество рассматриваемых гармоник номерами $n = -\hat{m}_{\Phi M}...\hat{m}_{\Phi M}$, считая $\hat{m}_{\Phi M}$ целым числом, то среднюю мощность ФДН сигнала в частотном пространстве можно выразить посредством следующей формулы

$$P_{\rm cp}(\hat{m}_{\rm \Phi M}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{U_m^2}{2} (J_n(\hat{m}_{\rm \Phi M}))^2 .$$
 (24)

Соответственно, доля полной средней мощности, приходящаяся на значение индекса фазовой модуляции, составит

$$\frac{2P_{\rm cp}(\hat{m}_{\rm \Phi M})}{U_m^2} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (J_n(\hat{m}_{\rm \Phi M}))^2 .$$
 (25)

Для полученного значения, на рис. 5 представлен соответствующий график. Анализ полученных результатов показывает, наилучшие условия обеспечиваются для $\hat{m}_{\Phi M} = [2; 12]$. Для окончательного выбора значения индекса в интересах синтеза практических конструкций, необходимо учитывать долю энергии, приходящейся на несущую частоту и ширину спектра результирующего колебания.



Другим критерием выбора индекса модуляции может рассматриваться значение средней энергии, приходящееся только на боковые (информационные) составляющие спектра.

$$\frac{2P_{\rm cp}(\hat{m}_{\rm \Phi M})}{U_m^2} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (J_n(\hat{m}_{\rm \Phi M}))^2 - (J_0(\hat{m}_{\rm \Phi M}))^2.$$
 (26)

На рис. 6 представлена графическая интерпретация выражения (26).



в зависимости от индекса модуляции, приходящаяся на информационные составляющие

Анализ полученных результатов, показывает, что наиболее энергетически эффективные форматы ФДН сигналов возможны при $\hat{m}_{\Phi M}$ равных 2, 6, 9, 12 (при условии $\hat{m}_{\Phi M}$ – целое число).



Рис. 7. Спектры ФДН сигналов при индексе модуляции: 12 (вверху); и 2 – (по середине); спектр ФМн-2 сигнала (внизу)

При этом разница между значениями выражения (26) при $\hat{m}_{\Phi M} = 2$ и $\hat{m}_{\Phi M} = 12$ составит не более 5%. Однако увеличение индекса модуляции ведет к расширению полосы занимаемых частот более чем в 4 раза, т.е. к снижению спектральной эффективности (см. рис. 7).

Указанные обстоятельства предполагают выбор $\hat{m}_{\Phi M} = 2$ для дальнейших исследований.

Анализ спектральной эффективности фаза-дискретно-непрерывных сигналов

Оценка эффективности разработанных ФДН сигналов проводилась на основе компьютерного моделирования, где информационный сигнал I(t) был определен в виде импульсной последовательности (см. рис. 8). Здесь и далее на рисунках указано не абсолютное время, а число дискретных отсчетов.



Затем на его основе в соответствии с выражениями (13), (14) и (16) были синтезированы сигналы ФМн-2 и ФДН-2, на несущих колебаниях с одинако-

выми частотами. Предварительно, перед синтезом сигнала ФДН-2 был сформирован модулирующий сигнал, в соответствии с выражением (15), из расчета один период на длительности информационного символа.

Так, на рис. 9 показаны: информационный сигнал I(t) на длительности трех информационных символов; сигнал $\hat{u}_{\Omega}(t)$, модулирующий результирующий сигнал ФДН-2; сформированный сигнал ФМн-2 $s_{\Phi M H 2}(t)$; сформированный сигнал $s_{\Phi D H 2}(t)$. На графиках указаны разрывы фазы в местах смены информационных символов.





Затем, была проведена оценка спектральной эффективности сигналов ФДН по сравнению с ФМн, которая оценивалась как отношение полос занимаемых спектрами исследуемых сигналов

$$\gamma^{A} = \frac{\Delta F_{\Phi M H 2}^{A}}{\Delta F_{\Phi \Pi H 2}^{A}}, \qquad (27)$$

где A – число (в процентах), обрабатываемых (учитываемых) частотных составляющих спектра.

Таким образом, значение
$$\gamma^{97\%} = \frac{\Delta F_{\Phi MH2}^{97\%}}{\Delta F_{\Phi \Pi H2}^{97\%}} = 2,75$$

указывает, что для учета 97% частотных составляющих спектра, полоса частот для сигнала ФМн-2 должна быть в 2,75 раза шире аналогичной полосы для сигнала ФДН-2. В таблице указаны значения показателя, определяемого формулой (27), полученные в ходе исследования.

Результаты спектральной эффективности сигнала ФДН-2 по отношению к сигналу ФМн-2

A, %	99,5	98	97	96,7	84,3	
γ^A	5	3,03	2,75	2,7	0,67	

Анализ результатов таблицы показывает, что свыше уровня 96% учета спектральных составляющих сигналы ФДН-2 имеют существенное превосходство по отношению к сигналам ФМн-2 по показателю спектральной эффективности. Указанный факт объясняется наличием ярко выраженных спектральных составляющих, которые фактически ограничивают полосу значимых частот для рассматриваемого вида сигналов (см. рис. 7).

Однако при этом именно ФДН сигналы при $\hat{m}_{\Phi M} = 2$ сохраняют помехоустойчивость близкую к сигналам ФМн (см. рис. 10).

Выбор для формирования ФДН сигналов индекса модуляции меньше двух нецелесообразен с позиций снижения помехоустойчивости таких конструкций. Хотя при этом существенно возрастает их спектральная эффективность. На рис. 10 показаны экспериментальные значения оценки помехоустойчивости, для ФДН сигналов с индексами модуляции 2 и 1, полученные в ходе компьютерного моделирования.



Рис. 10. Зависимость вероятности битовой ошибки в канале от ОСШ для ФДН сигналов

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить о достижении поставленной цели настоящей работы. При этом выбор конкретного значения индекса модуляции в практических приложениях должен выбираться исходя из возможностей канала и решаемых задач.

Заключение

Результаты теоретического исследования и данные практического эксперимента позволяют заключить, о том, что разработанный подход отвечает требованиям формирования сигналов с плавным изменением фазы, обеспечивающих передачу дискретной информации.

В настоящей работе проанализирована возможность формирования сигналов для двухпозиционной фазовой манипуляции. Однако разработанный подход допускает использование в качестве модулирующего сигнала и другие сигнальные конструкции. В частности, ФМн-4, сигналы с минимальным частотным сдвигом, а также более сложные сигналы квадратурной амплитудной модуляции [10] и др.

Дальнейшие исследования авторы связывают с вопросами разработки эффективных методов демодуляции сигналов ФДН [11]. Поскольку гармоника основой частоты не является информационной, это позволяет ее исключить в ходе дальнейшей обработки. Таким образом, по аналогии с амплитудной модуляцией, открывается возможность синтеза ФДН сигналов с балансной модуляцией, с частично подавленной несущей и с одной боковой полосой. В то же время, ярко выраженный пик в частной области может быть использован для обнаружения излучений [12]. Но все эти вопросы требуют дальнейшего исследования.

Литература

1. Федосеев, В.Е. Методика и результаты анализа потенциальной помехоустойчивости приема цифрового сигнала на фоне манипулированной структурной помехи [Текст] / В.Е. Федосеев, М.С. Иванов // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - Т. 6. - № 11. - С. 108-111.

2. Дворников, С.В. Помехоустойчивость фазоманипулированных сигналов на основе вейвлетов Гаусса [Текст] / С.В. Дворников, С.С. Манаенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. -2015. - Т. 11. - № 3. - С. 123-125.

3. Дворников, С.В. Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций [Текст] / С.В. Дворников, С.С. Дворников, А.М. Спирин // Информационные технологии. - 2013. - № 12. - С. 52-55.

4. L. Hong and K. C. Ho. Classification of BPSK and QPSK signals with unknown signal level using the Bayes technique. in Proc. IEEE ISCAS, 2003, pp. IV.1-IV.4.

5. P. Panagiotou, A. Anastasoupoulos, and A. Polydoros. Likelihood ratio tests for modulation classification. in Proc. IEEE MILCOM, 2000, pp. 670- 674.

6. Abramson N. Bandwidth and Spectra of Phase- and Frequency-Modulated Waves. Trans. IEEE, Communications Systems, vol. CS-11 (Dec. 1963), pp. 407-414.

7. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение [Текст] : пер. с англ. / Б. Скляр. - Изд. 2-е испр. – М.: ИД «Вильямс», 2004. -1104 с.

8. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

9. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст]: учебник для вузов / А.Б. Сергиенко. - 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 751 с.

10. Повышение помехоустойчивости сигналов кам-16 с трансформированными созвездиями [Текст] / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, А.А. Русин, А.С. Дворников // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. - 2014. - № 2. - С. 51-56.

11. Демодуляция сигналов ОФТ на основе адаптивного порога [Текст] / С.В. Дворников, А.А. Устинов, А.В. Пшеничников, В.В. Борисов, А.Г. Москалец, Д.А. Бурыкин // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. - 2013. - № 2. - С. 90-97.

12. Дворников, С.В. Метод обнаружения сигналов диапазона ВЧ на основе двухэтапного алгоритма принятия решения [Текст] / С.В. Дворников // Научное приборостроение. - 2005. - Т. 15. - № 3. - С. 114-119.

Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, г. Санкт-Петербург

SPECTRAL-EFFICIENT SIGNAL WITH THE CONTINUOUS PHASE

S.V. Dvornikov, S.S. Dvornikov, S.S. Manaenko, A.V. Pshenichnicov

The paper presents the materials to study signals of gradual phase change for the transmission of digital information. Settle the procedure for synthesis such signals. We consider their spectral efficiency, and analyzes the results of the computer simulation

Key words: phase modulation, spectral efficiency, the transfer of digital data

ЦИФРОВОЙ ДЕМОДУЛЯТОР СИГНАЛОВ С ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

А.Н. Глушков, Б.Н. Колбов, В.П. Литвиненко

Рассматривается реализация цифрового демодулятора сигналов с относительной фазовой манипуляцией на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС)

Ключевые слова: фазовая манипуляция, цифровая демодуляция, программируемые логические интегральные схемы, verilog

Двоичные сигналы с относительной фазовой (ОФМ) манипуляцией [1], предложенные Н.Т. Петровичем [2], применяются в некогерентных системах передачи дискретной информации, в которых отсутствует необходимость фазовой синхронизации демодулятора. В современных условиях актуальной является разработка цифровых демодуляторов на основе быстрых цифровых алгоритмов обработки узкополосных сигналов [3], реализованных в патенте [4].

Структурная схема цифрового демодулятора сигналов с относительной фазовой манипуляцией [4] показана на рис. 1.



Рис. 1

Входной радиосигнал двоичного элемента с фазовой манипуляцией с выхода тракта промежуточной частоты приемника имеет вид

$$s(t) = S \cos(2\pi f_0 t + \psi + a \cdot \pi / 2),$$
 (1)

S - амплитуда, ψ - начальная фаза, f_0 - несущая (промежуточная) частота, $a = \pm 1$. Для двоичного сигнала с ОФМ информационный символ определяется разностью фаз 0 или π принимаемого и предшествующего элементов.

Входной сигнал (1) поступает на аналогоцифровой преобразователь (АЦП), квантующий его с частотой $f_{KB} = 4f_0$ по четыре отсчета s_{i0} , s_{i1} , s_{i2} , s_{i3} на i-м периоде несущей согласно [3]. Они запоминаются в многоразрядном регистре сдвига на 4 отсчета (МР4) и в вычитателях ВЫЧ₀ и ВЫЧ₁ формируются два квадратурных отсчета вида

$$\begin{cases} x_{i0} = s_{i0} - s_{i2}, \\ x_{i1} = s_{i1} - s_{i3}. \end{cases}$$
(2)

Значения x_{i0} , и x_{i1} поступают в каналы квадратурной обработки в которых реализуется быстрый алгоритм [3] вычисления их откликов

$$y_{i0} = \sum_{k=0}^{N-1} x_{(i-k)0} = \sum_{i=0}^{N-1} \left(s_{(i-k)0} - s_{(i-k)2} \right), \quad (3)$$

$$y_{i1} = \sum_{k=0}^{N-1} x_{(i-k)1} = \sum_{i=0}^{N-1} \left(s_{(i-k)1} - s_{(i-k)3} \right), \quad (4)$$

N - число периодов несущей $T_0 = 1/f_0$ в двоичном элементе.

Значения x_{i0} поступают на вход сумматора СУМ₀₁, в котором складываются с предшествующим отсчетом $x_{(i-1)0}$, записанным ранее в многоразрядный регистр сдвига на одну ячейку МР₀₁, после чего в регистр записывается x_{i0} . Аналогично сумма $x_{i0} + x_{(i-1)0}$ складывается с ранее записанным в регистр МР₀₂ сдвига на две ячейки значением $x_{(i-2)0} + x_{(i-3)0}$, после чего данные в регистре сдвигаются. Далее процесс вычисления проводится аналогично и на выходе (n-1)-го каскада появляется сумма (3),

$$n = \log_2 N + 1. \tag{5}$$

Аналогично вычисляется сумма (4) в другом квадратурном канале.

Далее отклики y_{i0} и y_{i1} сравниваются со значениями $y_{(i-N)0}$ и $y_{(i-N)1}$, полученными на N периодов ранее и записанными в регистрах MP_{0n} и MP_{1n} , и в сумматорах CYM_{0n} и CYM_{1n} вычисляются отклики квадратурных каналов на соседние двоичные элементы с равными фазами

$$u_{i00} = y_{i0} + y_{(i-N)0}, \qquad (6)$$

$$u_{i10} = y_{i1} + y_{(i-N)1}, \qquad (7)$$

а в вычитателях $B B I H_{0n}$ и $B B I H_{1n}$ – отклики

$$u_{i01} = y_{i0} - y_{(i-N)0}, \qquad (8)$$

$$u_{i11} = y_{i1} - y_{(i-N)1} \tag{9}$$

Глушков Алексей Николаевич – Воронежский институт МВД РФ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 242-14-41 Колбов Богдан Николаевич – ВГТУ, студент, тел. 89601055294

Литвиненко Владимир Петрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 271-44-57

на элементы с противоположными фазами.

По полученным откликам в момент окончания очередного элемента сигнала с ОФМ по сигналам от системы тактовой синхронизации демодулятора вычисляются компоненты

$$z_{i0} = \sqrt{u_{i00}^2 + u_{i10}^2} , \qquad (10)$$

$$z_{i1} = \sqrt{u_{i01}^2 + u_{i11}^2} \tag{11}$$

решающего правила, которое заключается в следующем: если $z_{i0} > z_{i1}$, то принимается решение о передаче символа 0, а иначе 1.

Актуальной задачей является оценка затрат аппаратных ресурсов, необходимых для реализации предложенного демодулятора на современных программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). На языке описания аппаратуры Verilog разработана RTL-модель [5] обведенной пунктиром на рис. 1 части цифрового демодулятора сигналов с ОФМ, работающего по рассмотренному выше алгоритму. Модель является полностью параметризированной. В зависимости от разрядности входных отсчетов АЦП, а также числа периодов N несущей, автоматически выбирается минимально необходимое число звеньев в канале квадратурной обработки и разрядность накопительных регистров.

Полученный цифровой демодулятор тактируется с частотой, равной частоте несущей (регистр МР4 на рис. 1 отнесен к АЦП), имеет четыре входные шины для получения результатов АЦП, а также один выход для последовательно вывода демодулированного сообщения. Общий вид верхнего модуля полученной модели представлен на рис. 2.



Для оценки возможностей аппаратной реализации разработанного Verilog-описания применялась среда разработки Xilinx ISE, а в качестве целевых устройств рассматривались ПЛИС различных семейств из разных ценовых диапазонов. В ходе исследования использованы: модель XC6SLX9-2TQG144 семейства Spartan 6 (средняя розничная цена ~\$7), XC5VLX110T-1FF1136 из семейства Virtex 5 (~\$200), XC7K480T-1FFG1156 Kintex 7 (~\$3200).

Для каждой из рассмотренных моделей проводился синтез электрической схемы, размещение схемы на кристалле, и затем анализировались временные и количественные параметры полученных устройств.

Временной анализ показал, что демодулятор, реализованный на данных ПЛИС, имеет многократный запас по частоте – схемы способны работать на тактовой частоте в несколько сотен МГц. Так, например, для модели из семейства Virtex 5 предельно возможная тактовая частота достигает 653 МГц.

В таблице приведены результаты количественной оценки необходимых аппаратных ресурсов (в числителе) и их общего количества (в знаменателе) для указанных выше моделей ПЛИС (в скобках указана относительная доля использованных ресурсов). Выбраны следующие параметры модели: разрядность АЦП $W_{ADC} = 8$ бит, число периодов несущей на символ N = 128, задаваемая при синтезе тактовая частота $f_0 = 100$ МГц. Для элементов ПЛИС приняты обозначения: Flip-Flop (триггер), LUT (коммутационный элемент), Slice (базовый логический элемент), DSP48 (секция цифровой обработки сигналов).

Эле-	Spartan 6	Virtex 5	Kintex 7
менты			
Flip	598/11440	600/69120	598/597200
Flops	(5%)	(<1%)	(<1%)
LUTs	2035/5720	1936/69120	2010/298600
	(35%)	(2%)	(<1%)
Slices	720/1430	682/17280	672/74650
	(50%)	(3%)	(<1%)
DSP48	4/16 (25%)	4/64 (6%)	4/1920 (<1%)

Как видно из таблицы, демодулятор требует относительно незначительного количества ресурсов даже на «младшем» семействе Spartan 6, не говоря уже о «старших» линейках ПЛИС.

Субъективную оценку занимаемого места на ПЛИС также можно дать по схеме размещения демодулятора на кристалле. Пример его расположения на недорогой ПЛИС семейства Spartan 6 показан на рис. 3.



Представляет интерес исследование влияния характеристик демодулятора на количество требуемых для его реализации элементов. В качестве «опорной» ПЛИС была выбрана модель семейства Virtex 5 (таблица).

На рис. 4 показаны зависимости от N относительной доли требуемых логических элементов при вышеуказанных параметрах модели. Как видно, при увеличении N от 32 до 512 количество требуемых аппаратных ресурсов вырастает почти в 2 раза.



Следовательно, разработанная модель цифрового демодулятора позволяет гибко конфигурировать параметр N, оказывая незначительное влияние на количество требуемых элементов.

Рассмотрено влияние разрядности отсчетов АЦП на количество логических элементов (рис. 5) при N = 128.



Как видно из рис. 5, величина разрядности результата АЦП оказывает более значимое влияние на требуемые аппаратные ресурсы - так при увели-

Воронежский институт МВД РФ Воронежский государственный технический университет

DPSK SIGNALS DIGITAL DEMODULATOR

A.N. Glushkov, B.N. Kolbov, V.P. Litvinenko

DPSK signals digital demodulator hardware implementation on programmable logic integrated circuits (FPGA)

Key words: phase modulation, digital demodulation, FPGA, verilog

чении разрядности в 2 раза, количество необходимых элементов тоже возросло практически в 2 раза. Это можно объяснить тем, что разрядность входных данных определяет разрядность внутренних арифметических устройств.

Весомым параметром реализации демодулятора является потребляемая мощность. Ее величина слабо зависит от $N = 32 \div 512$ и при $W_{ADC} = 8$ бит, и $f_0 = 100$ МГц составляет 15-19 мВт. При изменении тактовой частоты f_0 от 50 МГц до 300 МГц, потребляемая мощность возросла от 13 до 31 мВт.

Результаты исследования показали, что реализованный на Verilog блок цифрового демодулятора обладает достаточным быстродействием, чтобы обрабатывать модулированные ОФМ сигналы на промежуточной частоте радиоприемника, а также является вполне компактным и масштабируемым. Это позволяет использовать данный цифровой демодулятор на широком классе ПЛИС, при этом оставляя место для размещения других цифровых блоков обработки сигнала, составляющих радиоприемный тракт.

Литература

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений [Текст] / Л.М. Финк. - М.: Советское радио, 1970. - 728с.

2. Петрович Н.Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией [Текст] / Н.Т. Петрович. -М.: Сов радио, 1965. - 263 с.

3. A. N. Glushkov, V. P. Litvinenko, B. V. Matveev, O. V. Chernoyarov. Basic Algorithm for the Noncoherent Digital Processing of the Narrowband Radio Signals. Applied Mathematical Sciences, Vol. 9, 2015, no. 95, 4727 – 4735.

4. Патент РФ № 2505922 от 27.01.2014. Цифровой демодулятор сигналов с относительной фазовой манипуляцией. / А.Н. Глушков, В.П. Литвиненко

5. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС [Текст] / К. Максфилд. – М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2007. - 400 с.

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ С ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫМ РАЗНЕСЕНИЕМ

Р.П. Краснов

В статье рассмотрена система атмосферной оптической связи с пространственно-частотным разнесением, построенная на базе углекислотного и полупроводникового лазерных излучателей. Получены зависимости коэффициента битовых ошибок приема от отношения сигнал/шум. Приведен анализ оптимального числа пространственно разнесенных каналов на каждой из рабочих длин волн

Ключевые слова: АОЛСП, лазер, разнесенный прием

Атмосферные оптические системы передачи (АОСП) становятся популярным средством обеспечения широкополосного доступа. Последние успешные эксперименты по увеличению скорости передачи до 2.5Гбит/с и выше [1] позволяют расценивать технологию АОСП как возможного кандидата на роль беспроводной сети широкополосного доступа в сетях связи следующего поколения (NGN) [2].

К положительным качествам таких систем относятся невысокая стоимость, быстрота развертывания, компактные размеры и невысокое энергопотребление приемопередающих модулей, отсутствие необходимости лицензирования частотного диапазона.

Существует ряд факторов, ограничивающих области применения АОСП. Прямолинейная траектория распространения оптического сигнала требует расположения оптических приемопередатчиков в зоне прямой видимости. Хотя малый диаметр светового пучка и обеспечивает скрытность передачи и высокую концентрацию энергии в пространстве, необходима организация системы наведения и трекинга для компенсации отклонения приемопередатчиков и самого принимаемого пучка.

Однако важнейшим фактором, препятствующим повсеместному внедрению систем АОСП, является зависимость показателя преломления (и как следствие коэффициента передачи) атмосферного канала от погодных условий, вариаций давления и температуры среды оптической трассы. Поэтому современные образцы АОСП, обеспечивающие достаточный для коммерческого применения коэффициент готовности, предполагают размещение приемопередающих модулей для городских линий связи на максимальном удалении до 1км [3].

Для уменьшения степени воздействия канала передачи на качество связи организуют резервный радиоканал, работающий в гражданском диапазоне радиочастот, однако переход на резервный канал резко снижет скорость передачи. Другим решением является развертывание систем АОСП, использующих несколько оптических пучков для передачи данных, что позволяет осуществить пространственное, пространственно-временное или пространственно – частотное разнесение принимаемых оптических сигналов.

Рассматриваемая система АОСП позволяет, используя комбинированные сигналы от полупроводникового и углекислотного лазеров, увеличить эффективность пространственно - частотного разнесения и организовать таким образом высоконадежный канал передачи данных.

При распространении в открытом атмосферном канале оптический сигнал ослабляется в силу поглощения и рассеяния энергии. Эти процессы описываются законом Бира-Ламберта

$$\frac{I_R}{I_0} = \exp(-\gamma x), \qquad (1)$$

где I_R , I_0 – интенсивность светового сигнала на приемной стороне в плоскости приемной оптики и на выходе оптического передатчика соответственно, γ - коэффициент затухания (экстинкции), равный

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a, \qquad (2)$$

где α_m , α_a – коэффициенты молекулярного и аэрозольного поглощения, β_m , β_a – коэффициенты релеевского и Ми-рассеяния соответственно.

Явление рассеяния является доминирующим среди причин атмосферного затухания и в зависимости от размера рассеивающих частиц может быть преимущественно релеевским или Ми-рассеянием. Однако реальное распределение размеров частиц на пути следования оптического сигнала зачастую сложно для определения. Кроме того, ослабление сигнала в значительной степени зависит от метеорологической дальности видимости (МДВ). Поэтому в дальнейших расчетах будет использоваться экспериментально определенная в [4] формула для расчета коэффициента затухания:

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{550}\right)^{-q_v}.$$
 (3)

Здесь V – текущая МДВ, а параметр рассеяния q_V будет определяться в зависимости от V следующим образом:

$$q_{V} = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \kappa m \\ 1.3, & 50 \kappa m > V > 6 \kappa m \\ (0.16V + 0.34), & 6 \kappa m > V > 1 \kappa m \\ V - 0.5 & 1 \kappa m > V > 0.5 \kappa m \\ 0 & V < 0.5 \kappa m \end{cases}$$
(4)

Перепады температуры и ветер приводят к возникновению турбулентных течений и появлению вихревых участков, размеры которых варьируются в

Краснов Роман Петрович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: rpkrasnov@gmail.com, тел. 8 (473) 243-76-65

пределах от l_0 до L_0 , называемых внутренним и внешним масштабом турбулентности.

Атмосферная турбулентность может быть описана тремя параметрами: внутренним l_0 , внешним L_0 масштабами турбулентности и структурной постоянной показателя преломления C_n^2 . Зависимость последней от расстояния на длинах оптических трасс до 1км пренебрежимо мала. Вид турбулентности (слабая, умеренная, сильная) определяется рытовской дисперсией

$$\sigma_P^2 = 1,23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6},\tag{5}$$

где $k = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число, L – дальность связи. При этом слабой, умеренной и сильной турбулентности будут соответствовать значения $\sigma_p^2 < 1$, $\sigma_p^2 \approx 1$ и $\sigma_p^2 >> 1$.

Атмосферная турбулентность приводит к флуктуациям оптической мощности в точке приема (сцинтилляции).

Для описания флуктуаций интенсивности принимаемого сигнала будем использовать гамма-гамма распределение, определяемое [5] как

$$p(I_R) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I_R^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta I_R} \right), \quad (6)$$

где α и β - эффективные размеры крупно- и мелкомасштабных вихрей в турбулентной среде соответственно, расчет которых для плоской волны приводится, например, в [5]; $K_a(x)$ – модифицированная функция Бесселя второго рода порядка *а*. Выбор такого закона распределения обусловлен его универсальностью для различных видов турбулентности [6].

Дисперсия флуктуации интенсивности (индекс сцинтилляции) σ_{I}^{2} [5]

$$\sigma_I^2 = \frac{\left\langle \left[I_R - \left\langle I_R \right\rangle^2 \right]^2 \right\rangle}{\left\langle I_R \right\rangle^2},\tag{7}$$

где $\langle * \rangle$ -операция усреднения по ансамблю, может быть снижена за счет апертурного усреднения. При этом для приемника, оснащенного линзой диаметром *D*, индекс сцинтилляции переопределяется [5]:

$$\sigma_{I}^{2}(D) = \exp\left[\frac{0.49\sigma_{P}^{2}}{(1+0.65d^{2}+1.11\sigma_{P}^{12/5})^{7/6}} +, \quad (8) + \frac{0.51\sigma_{P}^{2}(1+0.69\sigma_{P}^{12/5})^{-5/6}}{1+0.9d^{2}+0.62d^{2}\sigma_{P}^{12/5}}\right] - 1$$

FAC $d = \sqrt{\frac{kD^{2}}{4L}}$.

При увеличении апертуры приемной оптики уровень сцинтилляций снижается, т.е. происходит апертурное усреднение интенсивности принимаемого сигнала. Эффективность апертурного усреднения оценивается коэффициентом

$$A = \sigma_I^2(D) / \sigma_I^2(0), \qquad (9)$$

где $\sigma_I^2(0)$ соответствует точечному приемнику (D = 0). Для случая слабой турбулентности [5]:

$$A \approx \left[1 + 1.062 \left(\frac{D^2 k}{4L} \right) \right]^{-7/6}.$$
 (10)

Спектральная плотность функции показателя преломления будет описываться распределением Кармана [5]

$$\Phi(k) = \frac{0.033C_n^2}{(k^2 + k_0^2)^{11/6}},$$
(11)

где k –волновое число, $k_0=2\pi/L_0$. Кармановская спектральная плотность учитывает внешний масштаб турбулентности, ограничивающий крупномасштабные фазовые эффекты, определяющие условия фазовой независимости при пространственном разнесении.

Система связи с несколькими передатчиками позволяет, используя техники разнесения, снизить влияние атмосферного канала на качество приема, повысив таким образом коэффициент готовности без применения сложных и дорогих систем с адаптивной оптикой. Комбинация пространственного и частотного разнесения повышает коэффициент готовности в еще большей степени. При этом необходимо обеспечить соблюдение двух условий: некоррелированности фазовых эффектов на разнесенных оптических трассах и слабой коррелированности эффектов атмосферного канала в окрестностях рабочих длин волн.

Организация частотного разнесения в современных коммерческих АОСП выполняется с помощью ИК полупроводниковых лазеров, работающих преимущественно с двумя диапазонами в окрестностях длин волн 800 нм совместно с 1310 либо 1550нм. Однако, в [7] было показано, что в сложных атмосферных условиях различие влияния атмосферного канала для указанных частот пренебрежимо мало, а значит организация частотного разнесения с применением таких излучателей малоэффективна.

Поэтому ниже предлагается конфигурация системы связи, использующая полупроводниковые излучатели с рабочей длиной волны около 800 нм в комбинации с компактными CO₂-излучателями ($\lambda_0 =$ 10,6 мкм), конструктивно схожими с представленными, например, в [8].

В расчетах применялась модель системы, иллюстрируемая рис. 1.

АОСП состоит из двух приемопередающих оптических модулей, расположенных в области прямой видимости. Для организации передачи данных применяется модуляция интенсивности на передающей стороне и режим прямого детектирования (некогерентный) на приемной. Формирователь потока преобразует цифровые сигналы s_0 в последовательность импульсов, используя NRZ-кодирование. Передающие модули с полупроводниковым и углекислотным излучателями формируют пару коллимированных оптических сигналов, распространяющихся по пространственно разнесенным оптическим трассам в турбулентном канале связи. Приемные модули осуществляют оптоэлектрическое преобразование, а также производят необходимое усиление полученного электрического сигнала. Пороговое устройство ПУ формирует выходной цифровой поток s_R используя один из алгоритмов объединения, описанных ниже.



Принимаемый сигнал имеет вид:

$$s_R = \eta I_R + n, \tag{12}$$

где η - эффективность электрооптического преобразования, n – сумма темнового, дробового, теплового и фонового шумов.

Будем считать, что оптический приемник регистрирует интенсивность оптического излучения (число фотонов достаточно велико), следовательно, можно считать [9], что все источники шумов являются гауссовскими.

Оптический сигнал при дальнейшем анализе будем считать гауссовским, описываемым приближением для плоской волны, которое [5] наиболее точно соответствует лазерному пучку в условиях городского размещения АОСП.

Тогда интенсивность оптического сигнала на расстоянии L от излучателя будет определяться следующим образом [9]:

$$I_{R} = \frac{(1 + \Lambda_{L})^{-1}}{1 + 1.36\sigma_{p}^{12/5} \left(\frac{\Lambda_{L}}{1 + \Lambda_{L}^{2}}\right)}.$$
 (13)

Параметр гауссовского пучка Λ_L на удалении L от оптического передатчика в плоскости приемной оптики находится как

$$\Lambda_L = \frac{2L}{kw_0^2 \left(1 + \left[\frac{\lambda_0 L}{\pi w_0^2}\right]^2\right)},$$
(14)

где w_0 – радиус пятна, на котором интенсивность излучения снижается в $1/e^2$ раз от максимума в центре.

Из-за случайного характера флуктуаций атмосферного коэффициента затухания фототок при сравнительно большой длительности интервала измерения должен рассматриваться как случайный процесс. Поэтому введем величину среднего фототока

$$\langle i_R \rangle = \eta \langle P_R \rangle, \tag{15}$$

где $\langle P_{R} \rangle$ среднее значение мощности оптического сигнала на входе фотодетектора, равное

$$\langle P_R \rangle = \frac{\pi}{8} D^2 \langle I_R \rangle$$
 (16)

Среднее значение интенсивности оптического излучения вычисляется по всей приемной апертуре с учетом коэффициента апертурного усреднения.

В условиях приема, ограниченного тепловым шумом, для гауссовских сигнала и шума отношение сигнал/шум при отсутствии турбулентности рассчитывается по формуле [5]:

$$SNR_{0} = \frac{\left\langle i_{R} \right\rangle^{2}}{2q\left\langle i_{R} \right\rangle B + 4k_{B}T_{0}\frac{B}{R}}.$$
(17)

Здесь B — ширина полосы частот входного фильтра приемника, T_0 — температура фотодетектора, R — сопротивление нагрузки, k_B — постоянная Больцмана.

Отношение сигнал/шум в присутствии турбулентности также становится случайной величиной. При этом в расчетах будет участвовать среднее значение (*SNR*), равное:

$$\langle SNR \rangle = \frac{SNR_0}{\sqrt{\frac{P_R}{\langle P_R \rangle} + \sigma_I^2 SNR_0^2}},$$
 (18)

где P_R – мгновенная мощность принимаемого оптического сигнала при отсутствии турбулентности. При расчете $\langle SNR \rangle$ принималось следующее допущение [9]:

$$P_R / \langle P_R \rangle \cong 1 + 1.63 \sigma_n^{12/5} \Lambda_L \,. \tag{19}$$

При ниаличии атмосферной турбулентности для оценки коэффициента битовых ошибок будем использовать усредненное отношение сигнал/шум. Тогда коэффициент битовых ошибок *BER* определяется как

$$BER = \frac{1}{2} \int_{0}^{\infty} p(I_R) erfc \left[\frac{\langle SNR \rangle \cdot u}{2\sqrt{2}} \right] du.$$
(20)

Для минимизации битовых ошибок и, следовательно, повышения коэффициента готовности АОСП необходимо выбрать оптимальный в заданных условиях алгоритм объединения для разнесенного приема.

В оптическом приемнике сигналы из каналов с некоррелированными замираниями объединяются в общий сигнал, поступающий на пороговое устройство. Наиболее просто реализуются следующие методы.

Селективное объединение (Selection Combining, SC) – легко получаемый в техническом плане способ. Оптическое излучение на апертуре, где фиксируется сигнал с наибольшим отношением сигнал/шум, передается на выход системы. При условии равенства шума в ветвях разнесения для описанной модели принимаемого сигнала, можно записать:

$$I_{SC} = \max(I_s, I_c), \tag{21}$$

где I_{SC} – сигнал на выходе приемного блока, I_s , I_c – интенсивность сигнала в канале полупроводникового и углекислотного лазеров соответственно. Коэффициент битовой ошибки приема при селективном объединении будет описываться следующим образом:

$$BER = \int_{0}^{\infty} p(I) Q\left(\frac{\eta I_{SC}}{\sqrt{2N_0}}\right) dI,$$
(22)

где N_0 – спектральная плотность мощности шума в канале, Q(x) - Q - функция.

Метод линейного сложения (Equal gain combining, EGC) сигналов предполагает объединение оптических канальных сигналов с равным весом. Поэтому для такой системы получаем:

$$I_{EGC} = I_s + I_c. \tag{23}$$

 I_{EGC} здесь представляет сигнал на выходе приемного блока. Битовая ошибка приема определяется так:

$$BER = \int_{0}^{\infty} p(I) \mathcal{Q}\left(\frac{\eta I_{EGC}}{\sqrt{2N_0}}\right) dI$$
 (24)

Определить вероятности ошибок 1 и 2 рода можно, задавшись пороговым уровнем принимаемого сигнала.

Моделирование проводилось для трех источников излучения с рабочими длинами волн 0,8, 1,55 и 10,6 мкм. Передаваемая мощность излучения составляла 0,11 Вт, диаметр пятна по уровню $(1/e^2)$ 1 см, расходимость излучения 2 мрад, максимальная протяженность канала – 1000 м. Приемники излучения имели диаметр апертуры 0,1 м и при ограничении тепловыми шумами обеспечивали чувствительность 1 мВт. Моделирование работы фотодетектора велось с использованием параметров фотодиодов SFH213 для длин волн 0,8, и 1,55 мкм, а также KV104 для 10,6 мкм [11]. Работа приемника предполагалась на стандартную нагрузку 50 Ом.

Для указанных длин волн был определен индекс сцинтилляции в канале с $C_n^2 = 0.5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$. Масштабы турбулентности принимались равными $l_0 = 0$, $L_0 = \infty$ (в предположении, что прием ведется с апертурным усреднением). Более точный расчет σ_I в отсутствие усреднения приведен в [5]. Результаты расчетов представлены на рис.2.



Наивысшее значение было получено для CO₂ – лазерного излучения, у излучения полупроводниковых лазеров разница в индексе сцинтилляции не-

значительна, что хорошо согласуется с выводами, сделанными в [7].

Зависимости средней мощности от протяженности линии связи для различных длин волн в разнесенных каналах приведены на рис. 3 и 4.

Излучение углекислотного лазера ослабляется в канале сильнее в сравнении с сигналом полупроводникового излучателя. Однако качество связи будет определяться оптимальным выбором алгоритма объединения канальных сигналов.



Данные рис. 5 иллюстрируют результаты оценки коэффициента битовых ошибок при использовании различных методов объединения как функции среднего отношения сигнал/шум $\langle SNR \rangle$. Представленные зависимости определены для турбулентного атмосферного канала, описываемого структурной постоянной показателя преломления. Для сравнительной оценки эффективности выбранных методов значения C_n^2 варьировались, перекрывая диапазон значений от умеренной до сильной турбулентности.

Рис 4



Селективное объединение позволяет достигать более высокого качества связи в условиях сильной турбулентности. Полученные результаты расчетов находятся в соответствии с теоретическими и экспериментальными данными, изложенными в [10].

Увеличение числа пространственно разнесенных каналов, отведенных под излучение на каждой из рабочих длин волн, не вызывает существенного снижения битовых ошибок. В качестве примера было выполнено моделирование работы АОСП, с числом пространственно разнесенного каналов N = 2 на длинах волн 10,6 мкм и 800 нм в атмосферных условиях с $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-13}$ м^{-1/3}. Результаты расчетов сравнивались с полученными данными для АОСП с одним каналом (N = 1) для каждой рабочей длины волны. В качестве методов объединения использованы описанные ранее селективное объединение и метод линейного сложения. Полученные зависимости представлены на рис. 6



Излучение CO₂ - лазера в большей степени подвержено влиянию атмосферных эффектов, чем излучение полупроводникового. Но поскольку на оптические сигналы полупроводниковых источников лазерного излучения, работающих на типичных длинах волн, атмосферный канал оказывает практически одинаковое влияние, организация некоррелированных пространственно разнесенных каналов оказывается затруднительной. Применение комбинации углекислотного и полупроводникового излучателей при оптимальном выборе метода объединения не приводит к снижению надежности линии связи, а повышает ее.

Увеличение числа каналов пространственного разнесения на каждой рабочей длине волны не приводит к существенному росту качества связи, а следовательно использование более одного канала на каждой длине волны неэффективно.

Литература

1. K. Kazaura et. All Enhancing performance of nextgeneration FSO communication systems using soft computing-based predictions // Optics Express, vol. 14, no.12, pp.4958-4968, june 2006

2. J.C. Juarez, A.Dwiedi, A.R.M. Jr S. D. Jones, V. Weerackody, R.A. Nichols Free-Space Optical Communications For Next-Generation Military Networks // IEEE Communications Magazine, vol. 44, no11, pp. 46-51, nov. 2006

3. Павлов, Н.М. Коэффициент готовности атмосферного канала АОЛП и методы его пределения / Н.М. Павлов //Фотон-экспресс-наука, №6, 2006, С. 78-90

4. H. Yuksel, S. Milner, C.C. Davis Aperture averaging for optimizing received design and system performance on free-space optical communication links // J. Opt. Netw., vol.4, no. 8, p.p. 462-475, aug.2005

5. L.C. Andrews, R.L. Philips Laser Beam Propagation Through Random Media, 2nd ed. – Bellingham, Washington: SPIE Perss, 2005, 820p.

6. J.A. Louthain, J.D. Schmidt Integrated approach to free-space optical communication // Proc. Of SPIE, vol. 7200, 720001, pp. 72001-1 – 72001-15, 2009.

7. I.I. Kim, Bruce McArthur, Eric Korevaar Comparsion of laser beam propagation at 785nm and 1550nm in fog and haze for optical wireless communications // Proc. of SPIE – vol. 4214, Optical Wireless Communications III. Ed. Eric J. Korevaar, February 2001, pp. 26-37.

8.Архипова, Н.В. CO₂ лазер с высокочастотным электромагнитным возбуждением //Н.В. Архипова, И.Н. Полухин, В.И. Юдин // Приборы и техника эксперимента, 2000, №1, С. 1-2.

9. Arun R. Majumadar, Jennifer C. Ricklin Optical and fiber communication reports. Free-Space Laser Communication. – New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2008, 417 p.

10. J.A. Louthain, J.D. Schmidt Anisoplanatism in airborne laser communication // Optics Express, Vol.16, No 14, p.p. 10769-10785, Jul. 2008

11. http://www.kolmartech.com/kv104 ds.htm

Воронежский государственный технический университет

MODEL OF ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM WITH THE SPATIAL-FREQUENCY DIVERSITY

R.P. Krasnov

In this article the of atmospheric optical communication system with spatial-frequency diversity based on carbon dioxide and semiconductor laser transmitters is considered. Dependences of receiver's bit error rate in relation to signal-to-noise ratio are received. The analysis of optimum number of diverse channels on each working wavelengths is given

Key words: FSO, laser, diversity

ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ МИКРОПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ

В.П. Смоленцев, В.В. Золотарев, И.Т. Коптев

Рассмотрен механизм формообразования поверхностного слоя сплавов при бесконтактной электрохимической обработке. Показано, что высота неровностей деталей зависит от режимов обработки, размеров структурных составляющих сплава. Неровности и микроуглубления имеют одну и ту же природу возникновения, их размеры связаны соотношением, постоянным для каждого материала. Приведены рекомендации по выбору средств измерений неровностей, глубины микроуглублений без проведения металлографических исследований. Это позволяет обосновать выбор припусков на финишные операции и обосновать возможность использования различных технологических приемов для получения деталей с высокой сопротивляемостью циклическим нагружениям. Рассмотрены комбинированные методы обработки, их возможности по формированию поверхностей с требуемым качеством и методы расчета режимов обработки

Ключевые слова: формирование микроповерхности, оценка качества, пути повышения качества деталей

Введение

В литературе не имеется убедительных сведений о механизме формирования профиля микроповерхности металлических материалов после электрохимической и комбинированной обработки, что ограничивает применение перспективных технологий в машиностроении. Без такой информации сложно использовать перспективные процессы, особенно лля изготовления наукоемких высоконагруженных где они решают задачи изделий. по поколений изготовлению техники новых летательных аппаратов.

Механизм формирования микропрофиля

При электрохимической размерной обработке (ЭХО) отсутствует механический контакт между электродом-инструментом и заготовкой. Поэтому микропогрешности рабочей поверхности инструмента не копируются на заготовке.

Ha рис. 1 приведена схема формообразования контура на аноде (детали). На катоде 1 имеется выступ "А", высота которого соизмерима с размерами межэлектродного зазора h_2 . Если высота выступа "А" на 1-2 порядка меньше зазора, то углубления на детали практически не будет. При высоте неровности "А" более 0,1 зазора она с инструмента копируется на деталь,

причем тем точнее, чем меньше соотношение размера "А" и зазора.





Такие выступы на детали, независимо от размеров, относятся к макронеровностям. Они формируются при соотношении $\frac{h_1 - h_2}{h} \ge 0,1$.

Для межэлектродных зазоров, обычно используемых на станках (0,15-0,3 мм), шероховатость рабочего профиля инструмента в 5-10 раз ниже граничного значения и не может копироваться на детали. Из условий безвихревого движения потока электролита шероховатость инструмента должна быть не выше 1-2 мкм. Эксперименты И моделирование формирования поверхностей после ЭХО показали, что уже в самом начале процесса практически полностью удаляются регулярные выступы предшествующей обработки и образуются неровности, которые в дальнейшем сохраняются независимо от снимаемого припуска.

Известно также, что микрорастравливания на границах зерен

Смоленцев Владислав Павлович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: <u>vsvolen@index.ru</u>, тел. 89036559970 Золотарев Владимир Викторович – ВГТУ, аспирант, e-mail: vsvolen@index.ru

Коптев Иван Тихонович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: <u>vsvolen@index.ru</u>

наблюдаются на материалах с только крупнозернистой структурой. Ha микрорастравливаний формирование оказывают влияние свойства анодных пленок, которые могут создавать нетокопроводящие зоны на границах зерен. тогла и микроуглубления формируются форме в

питтингов на поверхности зерна. Подобная картина наблюдалась учеными Тульского политехнического института на титановых сплавах при режимах обработки, не обеспечивающих удаление анодной пленки с поверхности электролизера.





Рис. 2. Механизм формирования микроповерхностей

В общем случае, (рис. 2, а) неровности на инструменте 1 ниже их граничного значения из условия обеспечения гидродинамики и поверхность катода можно считать плоской. После удаления определенного припуска с заготовки 2 ее поверхность может быть представлена, как показано на рис. 2, а, где индексом "3" обозначено зерно (соответственно 3₁; 3₂ и т.д.).

a)

Из материаловедения известно, что электропроводность зерна на несколько

порядков выше, чем связки. Если представить микроструктуру обрабатываемой поверхности в форме прямоугольника, приближенно повторяющих зерно и связку, то (рис. 2, б) удельное сопротивление " ρ " на зернах (3₁; 3₂ и т.д.) будет существенно ниже, чем на связках (C₁; C₂ ит.д.). На границе зерна и связки силовые линии поля конденсируются, и возникает зона повышенной напряженности.



Рис. 3. К выбору методов оценки качества поверхностного слоя

На рис. 3 показано формирование микроуглублений (R_z) и обоснование возможностей эффективного измерения шероховатости и глубины измененного слоя (T) после ЭХО.

Связка (С) в силу большого сопротивления, растворяется медленно, а на границе зерна (З) и связки идет интенсивный

съем материала с зерна (рис. 3, а). Видимо, в момент формообразования начальный микроуглубления, когда связка практически не "Б". растворилась co стороны на обрабатываемой поверхности имеются выступы (последнее наблюдалась учеными АН МССР на микрошлифах при значительных размерах связки). Для большинства сплавов

ширина связки (С) на несколько порядков меньше чем зерна (3). Поэтому по мере съема материала с границ зерна открывается доступ к боковым поверхностям связки, которые начинают растворяться. Из-за малой толщины связки (обычно в пределах нескольких микрон) ee растворение происходит достаточно быстро, а остаток связки удаляется напором электролита. В силу сказанного, после ЭХО практически не наблюдаются связки поверхности. выступы на Образующиеся углубления характеризуют шероховатость и глубину удаленного слоя. Скругленная форма боковых поверхностей углублений, образующихся на границе зерна и связки, ограничивает возможности применения измерительных средств для контроля шероховатости. В частности, нельзя обеспечить достоверности контроля после ЭХО при использовании эталонов, особенно, если они выполнялись лезвийными или абразивным инструментом. До 2-5 раз может дать ошибку использование интерферационных методов И способов измерения световым лучом. Наиболее точную картину дает контактный метод измерения с помощью иглы (профилометры, профилографы). Игла, проникая в углубление на границе зерна и связки (рис. 3, б), характеризует высоту неровностей. Если рассмотреть углубление на поперечном шлифе, то выяснится, что игла, как правило, не достигает донной части углубления. Поэтому значение неровностей замеренное будет зависеть от радиуса скругления вершины иглы (обычно до 15-20 мкм), а расстояние до днища определяет глубину впалины микрорастравливаний. Для одних и тех же материалов деталей соотношение высоты неровностей глубины (R_{τ}) И микрорастравливаний (T) после ЭХО на рабочих режимах сохраняется практически постоянным $\left(\frac{T}{R_z} \approx cons\right)$. Так для жаропрочных сплавов это соотношение составляет 1,5-1,6 (прибор 203 завода «Калибр»). Разработаны таблицы [1], характеризующие соотношение " К, " между шероховатостью и глубиной микроуглублений для различных сплавов. Положение зерен в сплаве относительно измерительной иглы носит случайный характер, поэтому результаты замеров имеют значительный разброс, учитываемый коэффициентом Для сплавов Κ,.

аустенитного класса с крупным зерном К₂ = материалов К₂=1,2-1,25; 1.1: титановых $K_2 = 1, 1 - 1, 2.$ алюминиевых сплавов мелкозернистых сталях сорбитной группы зерна растворяются практически целиком и под ними остаются углубления с пологим дном. Точность применяемых измерительных средств не позволяет выявить разницу между высотой неровностей И глубиной растравливаний, поэтому считают, что такие сплавы не имеют микрорастравливаний (К₁ ≈1 ; К, ≈1). Коэффициент пропорциональности К между высотой неровностей и глубиной микрорастравливаний оценивается через К₁, K_2 . (K = K₁·K₂). Замер шероховатости не представляет сложности, а с помощью коэффициента К удается, не прибегая к трудоемким исследованиям, установить глубину измененного слоя и назначать припуски Z на финишные операции

$T = KR_a$; $Z \ge T$.

финишные Однако операции целесообразно совмещать с формообразующими, следует поэтому разработать технологический процесс. появление позволяющий устранить дефектного слоя. Из физики процесса ЭХО известно, что с ростом тока на аноде глубина микрорастравливаний снижается. Достичь такого режима можно за счет уменьшения зазоров, увеличения напряжения, повышения электропроводности и других свойств среды, использованием импульсного тока. Уменьшать зазор и увеличивать напряжение можно только до определенного предела, после того процесс нестабильным. становится Для снижения глубины микрорастравливаний целесообразно применять импульсный ток с крутым падением его величины В импульсе. Проведенные в Тульском политехническом институте исследования таких режимов показали возможность снижения глубины микроуглублений до 2 раз. Еще больший выигрыш в повышении качества поверхности импульсно-циклический лает метол. позволяющий реализовать высокий ток в импульсе и протекание процесса при малых межэлектродных зазорах. Исследования, выполненные в Новочеркасском политехническом институте, показали, что избежать микрорастравливаний можно, вводя в электролит различные добавки, в том числе поверхностно-активные вещества. Механизм

их воздействия можно объяснить концентрацией среды на границах зерен и равномерным распределением напряженности полей, обеспечивающих одинаковый съем со структурных составляющих материалов. Локазательством этой служит гипотезе заметное снижение неровностей на поверхности после обработки в электролитах с поверхностно-активными веществами.

Влияние микронеровностей на выносливость сплавов

Исслелования. выполненные A.M. Сулимой [2], показали определяющее влияние на характеристики выносливости сплавов шероховатости поверхности. Применительно к ЭХО, где имеются концентраторы напряжений в форме микрорастравливаний, неровности приходится рассматривать как часть микроуглублений и, предложенные в работах А.М. Сулимы формальные зависимости для расчета пределов прочности материалов при нагружениях, многоцикловых становятся справедливыми только для сплавов с мелким зерном. Для жаропрочных и титановых сплавов необходимо учитывать местную концентрацию напряжений за счет микроуглублений, имеющихся в донной части углублений, где формируются малые радиусы скругления (в пределах нескольких микрон).

Высоконагруженные детали после ЭХО полируют, удаляя при этом 0,01-0,05 мм материала. Усталостные испытания. выполненные машинах МУИ-6000. на показали, что после удаления слоя, глубиной соизмеримого с микрорастравливаний, сплавов для всех предел прочности полностью восстанавливается, а за счет наклепа поверхности при полировании этот показатель может даже превысить исходное значение. Величина припуска под операцию зависит от шероховатости (и связанным с ним микрорастравливанием), поэтому для сплавов с мелкозернистой структурой минимальный припуск не превышает 10мкм. а лля титанового сплава BT8 глубиной С растравливаний до 30 мкм съем должен быть около 40 мкм. Дальнейшее удаление припуска не дает повышения прочности.

Механическое полирование достаточно трудоемкая и, как правило, ручная операция, поэтому ее пытаются заменить электрохимической полировкой, виброударной обработкой, галтовкой.



Рис. 4. Сравнительные показатели выносливости сплавов при различных методах чистовой обработки: А - после ЭХО; Б - после ЭХО с последующим виброударным упрочнением; В - после комбинированной обработки с последующим удалением части припуска

электродом-щеткой; Г - после ЭХО, упрочнения и электрохимической полировки. Пунктиром нанесены показатели механической обработки

Приведенные на рис. 4 показатели дают основания рекомендовать в качестве последующей за ЭХО (рис. 4, а) операцией упрочняющую технологию (рис 4, б), откуда видно, что после виброударной обработки все сплавы имеют повышенную усталостную прочность, превышающую такой показатель, полученный после испытаний стандартных образцов после механической обработки. При этом шероховатость большинства сплавов не снижается (лля сталей мелкозернистой с структурой может наблюдаться незначительное повышение высоты неровностей по сравнению с состоянием поверхности после ЭХО без упрочнения), а степень наклепа достигает уровня, близкого к получаемому после механической обработки. Исключения составляют титановые сплавы, для которых поверхностный наклеп не всегда достаточен для восстановления предела

прочности до исходного, и здесь механическое снятие припусков (рис. 4, в) остается Эффективной предпочтительным. остается комбинированная обработка с удалением части припуска электродом-щеткой (рис. 4, в), микрогалтовка абразивными гранулами, которые позволяют одновременно с упрочнением снять припуск, достаточный для удаления дефективного слоя. Полировка (рис. 4, г) не дает возможности получения уровня, достигаемого при упрочнении.

Металлографические исследования образцов после финишного электрохимического полирования показали увеличение микрорастравливаний, что приводит к снижению предела прочности материалов. Кроме того, появляется наводораживание поверхности, что также снижает усталостную прочность. Поэтому электрохимическое полирование после ЭХО практически не дает эффекта, кроме случаев улучшения декоративных свойств изделий, хотя механическое полирование позволяет получить результаты, близкие к приведенным на рис. 4, в. При обработке деталей кварцевым песком и чугунной дробью был установлен эффект резкого возрастания содержания водорода в поверхностном слое сплавов, что не может быть объяснено только влажностью среды. Видимо при такой обработке в поверхностном слое происходят химические преобразования. Попытки удалить водород вакуумным отжигом не дали заметных результатов, хотя после ЭХО такой процесс давал положительные результаты.

В литературе [1] имеются краткие сведения об эффективности использования сильных магнитных полей и радиоактивного облучения сплавов для повышения их усталостной прочности. Однако применительно к ЭХО обобщающих работ в этой области нам не известно.

Эффективность применения комбинированных процессов

Наиболее перспективными способами формирования поверхностей с заданными свойствами являются комбинированные процессы, часть которых показана в таблице.

	Шероховатость		Наклеп поверхности, %		Наводораживание (наличие)				
Метод	Стали	титано- вые сплавы	Алю- миние- вые сплавы	Ста- ли	тита- новые сплавы	алюми- ниевые сплавы	Ста- ли	титано- вые сплавы	алюми- ниевые сплавы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЭХО	0,3-1,0	1,0-1,25	0,5-1,0	отсутствуют		0	+	0	
(бесконтактный процесс)									
Электроабразивный	0,2-0,4	0,3-0,5	0,3-0,4	0	0	0	0	0	0
Обработка	2-2,5	-	2,5	До 15	-	-	0	0	0
электродом-щеткой				%					
Обработка рассыпа-	0,3-0,5	0,5-0,6	0,4-0,5	До 10		До	+	+	0
ющимся катодом				%		12 %			
Эрозионнохимический	2,5-5,0	3-6	-	-	-	-	0	0	0
Гальваномеханический	0,08-	-	-	0	-	-	0	-	-
	0,16								

Качество поверхностного слоя после	е ЭХО и комбиниј	рованных методов	обработки
------------------------------------	------------------	------------------	-----------

Примечание: 0 - показатель соответствует исходной (после обязательной обработки) величине «+» - показатель превышает исходный

«-» - данные отсутствуют

Оптимальное сочетание полученных свойств различных процессов в комбинированных способах обработки позволяет формировать поверхности с заранее свойствами. Приведенные заданными в таблице процессы дают возможность изменять характеристики поверхностного слоя, однако возможности здесь ограничены диапазонами изменения свойств исходных вариантов обработки.



Рис. 5. Комбинированная чистовая обработка каналов Снять ограничения по наклепу,

обеспечить заданное качество поверхности и

точность каналов удалось (рис. 5) за счет комбинированного воздействия анодного растворения и упрочняющего элемента [3; 4] (а.с. № 663518, 1085734). Это новый способ, котором используется принцип при регулирования продольной подачи при P=const. В этом случае, независимо от исходного припуска, за счет регулирования продольного перемещения скорости упрочняющего элемента 2 (рис. 5) припуск под дорнование имеет одно и то же значение, а изза постоянного расчетного усилия наклеп внутренней поверхности после ЭХО рабочей частью 3 инструмента будет стабильным и соответствовать величине, требуемой для получения заданной усталостной прочности сплава. Здесь достигается сразу 2 цели высокая точность (6-7 квалитет FOCT). заданный оптимальный наклеп при шероховатости R_a= 0,08-0,63 мкм.

Использование схемы на рис. 5 требует поддержания расчетного усилия перемещения, которое зависит от размеров канала, свойств заготовки и температуры в зоне обработки. Оборудование для реализации способа должно быть оснащено средствами адаптивного управления процессом. Такие средства были созданы под руководством З.Б. Садыкова и использованы в станке СЭХО-901, выпускаемого по заказам предприятий.

Заключение

Таким образом, существующие технологические процессы с использованием ЭХО, позволяют получать детали с высоким поверхности, качеством обеспечивающей надежную работу изделий при циклических нагружениях, причем с позиций обеспечения прочности для большинства случаев ЭХО может быть рекомендована в качестве финишной операции. Значительная часть исследований базируется на работах прошлых лет, часть которых приведена ниже.

Литература

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

2. Сулима, А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов [Текст] / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. М.: Машиностроение, 1974.

3. А.с. 663518 СССР, МКИ2 В 23Р,1/04. Способ электро-химико-механической обработки [Текст] / Смоленцев В.П., Примак В.С. – 2557194/25-08; заявлено 20.12.77: Бюл. № 19.

4. А.с. 1085734 СССР, МКИЗ В 23Р, 1/04. Способ электро-химико-механической обработки [Текст] / Болдырев А.И., Смоленцев В.П. – 3460386/25-08; заявлено 29.06.82, опубл. 1984, Бюл. № 14.

Воронежский государственный технический университет

ACHIEVEMENT OF REQUIRED MICROSURFACE BY DIMENSIONAL ELECTROCHEMICAL AND MIXED MACHINING

V.P. Smolentsev, V.V. Zolotarev, I.T. Koptev

Mechanism of surface layer formation by contactless electrochemical machining is viewed. Was demonstrated that roughness height of details depends on machining modes, dimensions of alloy structure. Roughness and micropits have the same cause of appearance. Their dimensions depend on proportions permanent for every material. Recommendations for choosing of instruments for measuring of roughness, depth of micropits without metallographical observations are described. These recommendations make it possible to explain choose of allowances for final operations and explain usability of different technological methods for getting details with high resistance by cyclic loadings. Mixed machining methods, their possibilities to form surfaces with required quality and calculation methods of machining modes are viewed

Key words: formation of microsurface, quality evaluation, ways to improve quality of details

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ ТИТАНА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В АЗОТОСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ

В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Б. Корчагин

Исследован процесс развития высокотемпературной деформации тонкостенных титановых заготовок с глобулярной микроструктурой в среде аргона и смеси аргона с азотом. Показано, что при использовании смеси аргона с азотом величина деформации образцов значительно снижается, за счет образования на их поверхности нитридных слоев. Путем аппроксимации результатов расчета получены выражения для оценки кинетики деформации и скорости ползучести образцов. Установлен диапазон изменения параметров режима сварки, в котором целесообразно использование аргоно-азотной смеси для снижения накопленной деформации тонкостенных конструкций при диффузионной сварке

Ключевые слова: титановые сплавы, тонкостенные конструкции, аргоно-азотная смесь, деформация, упрочнение

Существенным фактором, влияющим на высокотемпературную ползучесть металлов, является состояние их поверхности.

В работе [1] обобщены исследования по влиянию поверхностных пленок на жаропрочные свойства металлов. Испытаниями образцов из монокристаллов цинка, кадмия, алюминия и меди было установлено, что наличие на их поверхности оксидных пленок снижает скорость ползучести.

При испытаниях поликристаллических образцов часто получают противоречивые результаты. Для одних и тех же металлов в одних случаях пленка значительно повышает сопротивление ползучести, в других – не оказывает никакого влияния и, наконец, может оказывать разупрочняющее действие [1].

Скорость ползучести поликристаллического алюминия в зависимости от толщины оксидной пленки имеет экстремальный характер. При увеличении толщины пленки от 0 до 30 мкм скорость ползучести резко падает, а при увеличении толщины пленки более 30 мкм начинает расти [1].

Такая закономерность действия пленки на подложку является результатом двух конкурирующих процессов: с одной стороны, пленка препятствует выходу дислокаций на поверхность подложки, что в условиях ползучести приводит к уменьшению плотности подвижных дислокаций в приповерхностных слоях; с другой стороны, пленка сама служит источником дислокаций [1]. То есть при небольшой толщине пленки она будет упрочнять подложку, а при большой – разупрочнять.

Исследования, выполненные в работе [2], показали, что азотирование может быть эффективным средством повышения сопротивления высокотемпературной деформации титановых сплавов.

Экспериментальные исследования проводили в интервале температур 900 - 1000 °С и напряжений

Пешков Владимир Владимирович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: <u>otsp@vorstu.ru</u>

Булков Алексей Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: <u>bulkov ab@mail.ru</u>

Корчагин Илья Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: <u>otsp@vorstu.ru</u> сжатий от 1,0 до 4,0 МПа. Давление к образцу прикладывали после достижения им температуры испытания. В процессе испытания образец находился в среде аргона или в газовой смеси аргона (99 %) с азотом (1,0 %).

Ползучесть в среде аргона

На рис. 1 приведены типичные кривые ползучести сплава ВТ6 с исходной глобулярной микроструктурой. На кривых $\varepsilon_A = \varphi(\tau)$ присутствуют два участка, соответствующие неустановившейся и установившейся стадиям ползучести. Скорости установившейся ползучести $\dot{\varepsilon}_A$, вычисленные по линейным участкам зависимостей $\varepsilon_A = \varphi(\tau)$, с повышением температуры возрастают. Независимо от атомного механизма, контролирующего массоперенос при высокотемпературной деформации металлов, скорость ползучести является экспоненциальной функцией температуры [2, 3]:

$$\dot{\varepsilon} \sim \exp(-Q/RT),$$
 (1)

где Q - энергия активации процесса, контролирующего ползучесть.



Рис. 1. Кривые ползучести сплава ВТ6 при испытании в среде аргона при температурах, °C: 1-900; 2-950; 3-1000 и напряжении сжатия 2 МПа

Опытные данные в координатах $ln\dot{\varepsilon}_{A}$ -1/*T* укладываются на прямые линии (рис. 2), из тангенса угла наклона которых следует, что эффективная энергия активации процесса ползучести сплава BT6 в интервале температур 900-1000 °С составляет 240 кДж/моль.



Рис. 2. Температурная зависимость скорости ползучести сплава ВТ6 при напряжениях, МПа: 1-1,0; 2-2,0 и 3-3,0

Энергия активации ползучести сплавов: ОТ4 (*T*=800-950 °C); ВТ14 (*T*=850-950 °C); ВТ5 (*T*=900-975 °C) и ВТ20 (*T*=900-1000 °C) составляли 230, 234, 255 и 318 кДж/моль, соответственно [5].

В зависимости от атомного механизма, контролирующего установившуюся ползучесть, скорость течения металлов обычно находится либо в линейной ($\dot{\varepsilon} \sim p$), либо в степенной ($\dot{\varepsilon} \sim p^n$), либо в экспоненциальной ($\dot{\varepsilon} \sim \exp(-\gamma p/RT)$) зависимости от напряжения [4].

Экспериментальные значения скорости ползучести сплава ВТ6 при постоянных температурах укладываются на прямые линии в логарифмических координатах $ln \dot{\varepsilon}_A - ln p$ с тангенсом угла наклона 1,2 (рис. 3).



Рис. 3. Логарифмическая зависимость скорости ползучести сплава ВТ6 от напряжения при температурах, °C: 1-900; 2-950; 3-1000

Аналогичные зависимости $\dot{\varepsilon} = \varphi(p)$ наблюдались и на титановых сплавах ОТ4, ВТ5, ВТ14 и ВТ20 при их испытаниях в вакууме при температурах ниже окончания полиморфного превращения [5, 6].

Установленные закономерности высокотемпературной деформации сплава ВТ6 и их сопоставление с более ранними исследованиями ползучести титана другими авторами [5] дают основание считать, что ползучесть сплава ВТ6 в среде аргона так же, как и вакууме, осуществляется по механизму вязкого течения, контролируемого диффузионными процессами, развивающимися по границам зерен.

Оценку скорости ползучести сплава ВТ6 в интервале температур 900-1000 °С и напряжении 1,0-3,0 МПа можно проводить по выражению:

 $\dot{\varepsilon}_{A} = 1,8 \cdot 10^{5} \cdot p^{1.2} \cdot \exp(-240000/RT), c^{-1}.$ (2) Ползучесть в газовой смеси аргона с азотом

На рис. 4 приведены типичные кривые ползучести сплава ВТ6 с исходной глобулярной микроструктурой в смеси аргона (99 %) с азотом (1,0 %).



Рис. 4. Кривые ползучести сплава ВТ6 в смеси газов Ar (99%) и N₂ (1,0%) при температурах, °C:

1-900; 2-950; 3-1000 и напряжении сжатия 2 МПа

Сопоставление зависимостей $\varepsilon_N = \phi(\tau)$ с данными, полученными при тех же параметрах (*T*, *p* и τ), но в среде аргона, выявляет две принципиальные особенности:

- величина деформации при добавлении азота к аргону значительно снижается;

- кинетические кривые (рис. 4) носят затухающий характер.

Это связано с процессом взаимодействия сплава ВТ6 с азотом, содержащимся в газовой смеси, и формированием на поверхности образцов нитридных слоев, препятствующих развитию деформации. Обработка опытных данных $\varepsilon_N = \varphi(\tau)$ в логарифмических координатах $ln \dot{\varepsilon}_N - ln \tau$ (рис. 5) дает основание считать, что процесс ползучести может быть описан уравнением параболы:

$$\varepsilon_N = K_{\varepsilon}(T) \cdot \tau^m, \tag{3}$$

где K_{ε} - константа деформации, которую при постоянном напряжении в соответствии с представлением о диффузионном характере процесса и опытными данными следует считать экспоненциальной функцией температуры; численные значения K_{ε} для температур 900, 950 и 1000 °C составляют, соответственно: 1,46·10⁻⁵; 4,45·10⁻⁵ и 1,24·10⁻⁴ с⁻¹; *m* показатель степени, равный 0,7 и определяемый по тангенсу угла наклона прямых (рис. 5):

$$ln \varepsilon_N = ln K_{\varepsilon} + m \cdot ln \tau.$$


Рис. 5. Зависимость *ln* ε_λ=φ(*ln* τ) при температурах, °С: 1-900; 2-950; 3-1000 и напряжении 2 МПа

Зависимость $ln K_{\varepsilon}$ от 1/T представляет собой прямую линию (рис. 6), из углового коэффициента которой следует, что эффективная энергия активации процесса ползучести сплава ВТ6 в газовой смеси аргона с азотом составляет 265 кДж/моль, что значительно больше эффективной энергии активации процессов взаимодействия титана с азотом, приводящих к росту нитридов (170 кДж/моль), охрупченных слоев (203 кДж/моль) и газонасыщенных слоев (197 кДж/моль), но достаточно близко к энергии активации ползучести этого же сплава в среде аргона, которая равна 240 кДж/моль.



Рис. 6. зависимость $In K_{\varepsilon} = \varphi(1/I)$ при постоянном сжима ющем давлении p=2 МПа

Для того, чтобы судить о механизме ползучести сплава ВТ6 в смеси газов аргона с азотом, следует установить зависимость деформации от приложенного напряжения.

На рис. 7 приведены кривые $\varepsilon = \varphi(\tau)$, полученные при температуре 950 °С и напряжениях от 1,0 до 4,0 МПа.

Эти кривые носят затухающий характер и могут быть аппроксимированы выражением:

$$\varepsilon_N = K_p \cdot \tau^{0,7},$$
 (4)

где K_p - константа, которая при постоянной температуре является функцией напряжения.

Численные значения K_p , полученные по зависимости (3.4) при известных из экспериментов ε_N и τ (см. рис. 7) приведены в таблице.

<i>р</i> , МПа	1,0	2,0	3,0	4,0
$K_p,$ $c^{-0,7}$	$7,8.10^{-10^{-1}}$	4,45·10 ⁻ 5	$1,2.10^{-4}$	$2,5.10^{-4}$



Рис. 7. Кривые ползучести сплава ВТ6: в смеси газов *Ar* (99%) и *N*₂ (1,0%) при температуре 950 °С и напряжениях, МПа: 1-1,0; 2-2,0; 3-3,0 и 4-4,0

Из сопоставления значений K_p и соответствующих им p видно, что эти величины находятся не в пропорциональной, а в степенной зависимости, т.е. $K_p \sim p^n$.

В координатах $ln K_p - ln p$ значения K_p укладываются на прямую линию, из углового коэффициента которой следует, что n=2,5 (рис. 8).



Рис. 8. Зависимость $ln K_p = \varphi(ln p)$ при температуре испытания 950 °C

Установленная зависимость $K_p \sim p^{2.5}$ дает основание считать, что процесс деформации титана в смеси аргона с азотом осуществляется не по механизму вязкого течения, как это происходило при испытаниях на ползучесть в среде аргона, а за счет движения дислокаций, контролируемого диффузией.

Кинетика деформации сплава ВТ6 и скорость его ползучести в смеси аргона с азотом в исследованном интервале температур и напряжений могут быть описаны выражениями:

$$\varepsilon_{N} = 1,7 \cdot 10^{6} \cdot p^{2,5} \cdot \exp(-265000/RT) \cdot \tau^{0,7}, \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{N} = \frac{d\varepsilon_{N}}{d\tau} = 1,2 \cdot 10^{6} \cdot p^{2,5} \cdot \exp(-265000/RT) \cdot \tau^{-0,3} \cdot$$

Наглядное представление о влиянии длительности и температуры испытания на скорость ползу-

чести дают зависимости $\dot{\varepsilon} = \phi(\tau)$, приведенные на рис. 9.



Рис. 9. Зависимость скорости ползучести от длительности испытания при напряжении 2,0 МПа и температурах, °C: 1; 1'- 900; 2; 2'- 950 и 3; 3'- 1000 °C;

сплошная линия – испытание в смеси газов Ar (99 %)+ N_2 (1,0 %); прерывистая – испытание в среде аргона

Из этих зависимостей видно, что с течением времени скорость ползучести уменьшается, при этом наиболее интенсивное уменьшение $\dot{\varepsilon}_{N}$ наблюдается на начальных этапах испытания.

Согласно [1], первостепенную роль в развитии пластической деформации играют поверхностные слои. Поэтому уменьшение скорости ползучести при испытаниях в смеси аргона с азотом, в первую очередь, следует связывать с процессом взаимодействия титана с азотом, которые сопровождаются образованием на поверхности титана нитридов, охрупченных и газонасыщенных слоев. Наибольшую роль в уменьшении $\dot{\varepsilon}_{N}$ вначале, очевидно, играет процесс образования нитридных пленок, появление которых при *P*_N≥10³ Па предшествует образованию охрупченных и газонасыщенных слоев. Нитриды блокируют поверхностные источники дислокаций и препятствуют выходу дислокаций от внутренних источников на поверхность, тем самым снижая скорость развития деформации.

С практической точки зрения, целесообразно оценить эффективность снижения величины деформации при использовании вместо аргона его смеси с азотом.

Из (2) следует, что, если не учитывать неустановившуюся стадию ползучести, то развитие деформации $\varepsilon_A = \varphi(p, T, \tau)$ в среде аргона будет описываться выражением:

$$\varepsilon_A = 1.8 \cdot 10^5 \cdot p^{1.2} \cdot \exp(-240000/RT) \cdot \tau$$
, (6)

а развитие деформации в смеси аргона с азотом $\varepsilon_N = \varphi(p, T, \tau)$ описывается (5).

Тогда результаты сравнения ε_A и ε_N , показывающие во сколько раз ε_A больше ε_N при заданных параметрах режима, можно оценить по зависимости:

 $\varepsilon_A / \varepsilon_N = 1.05 \cdot 10^{-1} \cdot p^{-1.3} \cdot \exp(25000/RT) \cdot \tau^{0.3}$. (7)

Зависимости, построенные по выражению (7), приведены на рис. 10. Из анализа (7) и зависимостей (рис. 10) следует, что с повышением сжимающего напряжения p разница между ε_A и ε_N существенно уменьшается, и при $p \ge 3,5$ МПа эти величины становятся близкими. Полученные результаты согласуются с положениями работы [1] о том, что инородные пленки при деформации повышают критическое напряжение сдвига. Поэтому при увеличении p облегчается преодоление дислокациями барьеров, которыми являются поверхностные пленки и слои.



Рис. 10. Зависимости результатов $\varepsilon_A/\varepsilon_N$ (где ε_A и ε_N - деформации при испытании на ползучесть в среде аргона и газовой смеси аргона с азотом, соответственно) от сжимающих давлений *p* и длительности испытаний *r*: а - при 900 °C; б - при 950 °C; в - при 1000 °C

Из полученных результатов следует, что снижение накопленной деформации при термообработке тонкостенных конструкций за счет применения газовой смеси аргона с азотом для создания давлений целесообразно только при *p*<3,5 МПа.

Из рис. 10 также видно, что с повышением длительности испытания разница между ε_A и ε_N увеличивается. Например, при p = 2 МПа увеличение τ от 1000 до 2000 с приводит к увеличению разницы между ε_A и ε_N с 4 до 5 раз. Такое влияние τ следует связывать с развитием при испытании на ползучесть процесса взаимодействия титана с азотом, при котором рост поверхностных слоев с повышенным со-держанием азота пропорционален $\tau^{0,5}$.

Из анализа зависимости (7) видно, что повышение температуры хотя и незначительно, но всетаки приводит к уменьшению разницы между ε_A и ε_N . Можно предположить, что это связано с развитием двух одновременно протекающих термически активируемых процессов с различными энергиями активации, например, роста газонасыщенных слоев, приводящих к уменьшению ε_N , и увеличению подвижности дислокаций, приводящему к обратному эффекту. Но для более обоснованного объяснения зависимости $\varepsilon_A/\varepsilon_N = \varphi(T)$ требуется проведение дополнительных исследований.

Литература

1. Крамер И. Влияние среды на механические свойства металлов [Текст] / И. Крамер, Л. Демер. М.: Металлургия, 1964. 131 с.

2. Азотирование и его влияние на свойства титанового сплава ВТ20 [Текст] / А.В. Пешков, В.Ф. Селиванов, В.Р. Петренко, А.В. Кравцов // Сб.: Сварка и родственные технологии в машиностроении и электронике. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2005. – С. 64 – 76.

3. Гарофало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов [Текст] / Ф. Гарофало. М.: Металлургия, 1968. 304 с.

4. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов [Текст] / В.М. Розенберг. М.: Металлургия, 1973. – 326 с.

5. Бондарь А.В. Диффузионная сварка титана и его сплавов [Текст] / А.В. Бондарь, В.В. Пешков, Л.С. Киреев. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1998. 256 с.

6. Диффузионная сварка титана [Текст] / Э.С. Каракозов, Л.М. Орлова, В.В. Пешков и др.; под ред. Э.С. Каракозова. М.: Металлургия, 1977. 272 с.

Воронежский государственный технический университет

HIGH-TEMPERATURE CREEP OF TITANIUM WHEN TESTED IN AN ENVIRONMENT CONTAINING NITROGEN

V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, I.B. Korchagin

The process of high temperature deformation of thin-walled titanium billet with a globular microstructure in argon and a mixture of argon and nitrogen. It is shown that by using a mixture of argon and nitrogen samples deformation quantity is greatly reduced due to the formation on the surface of the nitride layers. By approximating the results of calculation expressions are obtained to assess the kinetics of deformation and creep speed samples. Established range of the welding parameters, in which it is advisable to use an argon-nitrogen mixture to reduce accumulated deformation of thin-walled structures with diffusion welding

Key words: titanium alloys, thin-walled structures, argon-nitrogen mixture, deformation, hardening

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБТЯЖНЫХ ПУАНСОНОВ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБШИВОК КАНАЛА ВОЗДУХОЗАБОРНИКА САМОЛЁТА

М.В. Молод, В.И. Максименков

В данной статье приведены результаты проектирования обтяжного пуансона, обеспечивающего повышение качества изготовления обшивок самолета на обтяжных прессах с учётом способа уменьшения трения

Ключевые слова: обшивка, пуансон, самолет, обтяжка, формообразование, трение

К обшивкам канала воздухозаборника самолёта сплошным перфорированным И требования предъявляются повышенные по точности. Обшивки изготовляют методом обтяжки н оборудовании с ЧПУ (1). При формообразовании обшивок возможно появление браковочных признаков – неравномерность деформации, разрывы заготовок, пружинение.

Разработана методика проектирования обтяжных пуансонов, позволяющая устранить указанные недостатки .

На рис. 1 изображен пуансон, вид сбоку; на рис. 2 – сечение А-А; на рис. 3 – сечение Б-Б.

Технологическую поверхность 1, контактирующую с технологическим припуском детали, стоят посредством проведения ¹ прямыхкасательных к границе 2 рабочей и технологической поверхностей, причем длину технологической поверхности T определяют, решая систему уравнений:

$$\begin{cases} T_{1} = \frac{Ck_{i}}{2} - \frac{P_{i}}{2} - O_{1} \\ O_{1} = \sqrt{l_{i} + T_{i}^{2} - 2P_{i}T_{i}\cos\alpha}, \end{cases}$$
(1)

где Ck_i – длина заготовки 3 между зажимными губками 4 в конечный момент деформирования, которая задается для всех продольных сечений увеличенной на одну и ту же степень деформации;

P_i – длина рабочей поверхности 5 обтяжного пуансона 6 в i-ом сечении;

O_i – минимальное расстояние между зажимной губкой 4 и краем технологической поверхности 1 в i-ом сечении в конечный момент деформирования;

Т_i – длина технологической поверхности в i-ом сечении;

Сk_i – длина заготовки между зажимными губками в конечный момент деформирования.

Длина технологической поверхности определяется в зависимости от длины сечений технологической поверхности и ее расположения, причем длина сечений технологической поверхности тем больше, чем меньше длина рабочей поверхности.

Построение технологической поверхности посредством поведения прямых-касательных к смежной ней рабочей поверхности с И направленных в сторону приложения усилия обтяжки обуславливается необходимостью сокращения ее длины и соблюдением при этом плавности сопряжения рабочей и технологической поверхностей.

Рассмотрим пример проектирования пуансона (рис. 1).



Рис. 1. Пуансон, вид сбоку



Рис. 2. Сечение А-А на рис. 1

Молод Марина Владиславовна – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: MolodMV@yandex.ru Максименков Владимир Иванович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: <u>maksimenkov.v.i@mail.ru</u>



Рис. 3. Сечение Б-Б на рис. 1

Задаемся первоначальной длиной заготовки, имеющей прямоугольную форму $C_i = 1000$ мм. Принимаем необходимую степень деформации для фиксирования формы детали во всех сечениях $\varepsilon = 0,02$. Длина заготовки после деформации должна быть во всех сечениях

$$Ck_i = C_i \cdot (1 + \varepsilon) = 1020 \text{ MM}$$

Расстояние от губок пресса до границы рабочей поверхности с технологической определяем, зная форму и размеры рабочей поверхности и задаваясь ее расположением относительно губок.

В таблице представлена зависимость длины технологической поверхности от P_i , α , l_i .

Длина	Длина рабочей		Расстояние от губки	Исконов вшина
деформир	поверхности	Угол	до границы рабочей	технологической
уемой	отяжного	α,	и технологической	поверхности
заготовки	пуансона,	рад.	поверхностей	Т. мм
Сk _i , мм.	Р _і , мм		і , мм	1, aa.
1020	581	0,2377	417,4	277
1020	584	0,2672	429,1	62
1020	580	0,2615	438	21
1020	574	0,2428	443,6	26

По приведенной методике был изготовлен пуансон. Материал пуансона алюминиевый сплав.

Обтяжка обшивок по данному пуансону показала на значительное повышение равномерности деформации на поверхности заготовки.

Эффективность процесса формообразования с данной конструкцией пуансона может быть повышена за счёт уменьшения трения при обтяжке перфорированных обшивок Вопросы оценки коэффициента трения при обтяжке обшивок являются предметом постоянного рассмотрения [1], [2].

Как правило, влияние трения при обтяжке определяется коэффициентом К_М:

$$K_{\rm M} = \exp[\frac{M_{\alpha}}{2 \cdot n}] \tag{2}$$

где М – коэффициент трения;

α – угол охвата заготовкой пуансона;

n – коэффициент упрочнения заготовки.

Основной способ, обеспечивающий уменьшение трения – это применение смазки, которая наносится на поверхность пуансона. Однако наличие шероховатости поверхности пуансона и заготовки оказывает влияние на процесс формообразования.

При этом устранить неравномерность деформации при обтяжке обшивок не удается, что оказывает влияние на их качество.

Разработан способ формообразования листовых материалов [2], который обеспечивает повышение качества и снижение трудоемкости изготовления деталей.

На рис. 4 показана схема процесса обтяжки обшивок.



Рис. 4. Схема процесса обтяжки обшивок 1 – обшивка, 2 – пуансон, 3, 4 – слоистый пленочный материал, 5 – смазка

Приведенный способ обеспечивает повышение равномерности деформации. Задача решается за счет того, что перед обтяжкой на пуансон укладывают два слоя пленки, а смазку наносят между пленками. При этом выполняется условие:

$$\mu_1 \approx \mu_2 > \mu_3 \tag{3}$$

где µ₁ – коэффициент трения между листовым металлическим материалом и верхним слоем пленки;

µ₂ – коэффициент трения между пуансоном и нижним слоем пленки;

 μ_3- коэффициент трения между поверхностями пленок.

Проведены экспериментальные исследования процесса обтяжки обшивок (рис 5). Перед обтяжкой на поверхность обшивки наносилась делительная сетка для оценки величины деформаций после формообразования.

Длину технологической поверхности определяли по следующей зависимости:

$$T_{i} = \frac{l_{i}^{2} - \left(\frac{Ck_{i}}{2} - \frac{P_{i}}{2}\right)^{2}}{2 \, l_{i} cos \alpha - Ck_{i} + P_{i}} \tag{4}$$



Рис. 5. Характер деформаций по поверхности обшивки с применением смазки 1 – обшивка, 2 – пуансон, 3, 4 – слоистый пленочный материал, 5 – смазка

Из результатов обработки эксперимента видно, что на вершине обшивки величина деформации составляет 2,5%, а на сходе обшивки с пуансоном величина деформации составляет 3,3% т.е. разница деформаций составляет 0,8% при этом коэффициент неравномерности деформаций К_{НД} = 1,32. Это объясняется следующим. Обшивка 1 находится в контакте с пленкой 3 и для создания более благоприятных условий процесса формообразования допускается обезжиривание контактирующих поверхностей, при этом коэффициент трения µ1 будет больше µ₃, так как процесс формообразования осуществляется по наружной поверхности пленки 4, на которую нанесена смазка 5, а внутренняя поверхность пленки укладывается на пуансон 2 и находится с ним в контакте. Контакт пленки 4 с пуансоном 2 уменьшает влияние шероховатости пуансона на коэффициент трения µ2 и практически его исключает.

Из проведенных ранее экспериментальных исследований следует, что в случае применения в качестве смазки мыла, нанесенного между пленками величина $\mu_3 = 0,013$; значения коэффициентов μ_1 и μ_2 на порядок больше. При полученных деформациях изготовление обшивки осуществляется за один переход, при этом исключается возможность разрыва заготовок, т.е. повышается качество получаемых обшивок и снижается трудоемкость их изготовления. Для сравнения осуществляли процесс формообразования обшивок без применения пленочного материала (рис. 6).



Рис. 6. Характер деформаций по поверхности обшивки с применением смазки 1 – обшивка, 2 – пуансон, 5 – смазка

Из результатов обработки эксперимента видно, что степень деформации в вершине обшивки составляет 2,2%, на сходе обшивки с пуансона 4,4%, т.е. разность деформаций составляет 2,2%, что объясняет тем, что процесс формообразования осуществляется по наружной поверхности пуансона 2, на нанесена смазка 5. который Полученная разность деформаций и высокое значение коэффициента неравномерности К_{НД} = 2 объясняется неравномерность тем, что на деформаций оказывает влияние состояние поверхности пуансона и заготовки.

Разработанная методика проектирования пуансонов, с учётом способа уменьшения трения, позволяет повысить равномерность деформаций при формообразовании перфорированных обшивок, исключить вероятность их разрыва, сократить количество переходов и снизить трудоемкость изготовления обшивок в 1,5 – 2 раза.

Литература

1. Одинг С.С. Оптимизация формообразования оболочек двойной кривизны на обтяжном оборудовании с ЧПУ [Текст] / С.С. Одинг // Кузнечно-штамповочное производство, 1995. - №11. С. 31-33.

2. Пат. 2459680 Российская Федерация С2 МПК В 21 D 11/20 Способ обтяжки листовых материалов / Максименков В.И., Молод М.В., Ляхова Н.Е., Решетникова Е.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ВГТУ». - №2009143306/02; заявл. 23.11.09; опуб. 27.08.12, Бюл. №24. – 5с.

Воронежский государственный технический университет

FEATURES DESIGN AND MANUFACTURE PULLING PUNCHES FOR FORMING AIRCRAFT SKINS

M.V. Molod ,V.I. Maksimenkov

This article presents the results of the design Pulling punch, providing high quality manufacturing to aircraft skins Pulling presses

Key words: boarding, punch, airplane, close-fitting, shaping

УДК 621.744.07:621.7.012.3./4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕВОЛЬВЕРНОЙ ПОДАЧИ С АККУМУЛЯТОРОМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В.С. Семеноженков, М.В. Семеноженков

Приведены описание методики экспериментальных исследований револьверных подач листоштамповочных автоматов и результаты испытаний. Показана эффективность разработанной конструкции револьверной подачи с аккумулятором механической энергии

Ключевые слова: подача, датчик, тарировка, скорость, ускорение, мощность

Качество получаемых на листоштамповочном оборудовании штамповок во многом определяется параметрами средств механизации. Кинематические характеристики рабочих звеньев подач заготовок непосредственно влияют на точность позиционирования как самих схватов и различных фиксаторов, так и обрабатываемых заготовок. Поэтому важно знать технические характеристики новых видов устройств механизации процесса подачи заготовок.

Исследовалась револьверная подача с аккумулятором механической энергии листоштамповочного автомата с моментом инерции поворотного стола M = 1,2 кгм², привод которой включает электродвигатель ДПР42-Н1-03 и редуктор с передаточным отношением $u_{\rm P} = 16$. Описание конструкции подачи и принцип ее действия приведены в работах [1, 2].

В процессе экспериментальных исследований регистрировались следующие параметры: ускорение и скорость поворотного стола; сила тока на электродвигателе. Для измерения ускорения использовали пьезоэлектрические датчики КД 41, для измерения скорости применяли тахогенератор, для определения мощности, учитывая постоянство напряжения за цикл работы, на осциллограмму который потреблял записывали ток, измерении электродвигатель. При ускорений крепление поверхности датчика на стола выполнялось с помощью удерживающего магнита, что позволило обеспечить надежное сцепление датчика со столом подачи и, кроме того, исключить влияние деформаций деталей на величину сигнала. Для исключения влияния других помех был использован экранированный кабель и защитная крышка для пьезоэлектрического датчика. Для снижения влияния высокочастотных помех сигнал с выхода интегрирующего усилителя поступал на универсальный фильтр, состоящий из 2-х блоков, каждый из которых содержит фильтр верхних и нижних частот, граничные значения которых можно переключать в диапазоне от 0,2 Гц до 160 кГц.

После фильтра сигнал поступал на запоминающее устройство – осциллограф Н 145.

Технические характеристики датчиков КД 41:

Коэффициент передачи напряжения, мВ/мс⁻² 12,22

Частота измерения, Гц 100

Максимальное ускорение, 1000 мс $^{-2}$ 1 Диапазон рабочих температур, T_{max}/T_{min} $^{0}C/^{0}C$ -20/+80

Напряжение, полученное от пьезоакселерометра, поступало на интегрирующий усилитель, где оно усиливалось И могло интегрироваться олин или лва раза Интегрирующий усилитель входит в комплект виброизмерительного прибора 00 033 фирмы «Роботрон». Виброизмеритель включает в себя 3 интегрирующих усилителя, осциллоскоп для визуального наблюдения и блок индикации.

Для выбранного датчика измерительные диапазоны виброизмерителя составляют:

ускорение – 0,032 м/ c^2320 м/ c^2 ;

скорость – 0,000032 м/с....3,2 м/с;

перемещение – 0,032 мм....100 мм;

частотный диапазон – 1Гц....1кГц.

Блок-схема измерительной цепи представлена на Тарировка с рис. 1. сигналов vскорения пьезоакселерометра проводилась с помощью генератора низких частот и вольтметра. С генератора низких частот сигнал частотой f = 10 Гц поступал на вольтметр, интегрирующий усилитель, фильтр и далее на осциллограф. Высота отклонения сигнала на осциллограмме h = 13 мм, коэффициент передачи напряжений для датчика КД 41 с учетом емкости и дополнительного кабеля (l = 5 м)латчика $B_{\rm a} = 9,24 \text{ MB/Mc}^{-2}$.

Симулированное ускорение

$$\widetilde{a} = \frac{u}{B} = 8,18 \text{ mc}^{-2}$$

Масштабный коэффициент

$$\mu_a = \frac{\ddot{a}}{h} = 0,63 \text{ mc}^{-2}/\text{mm}$$

При установке датчика на электродинамический калибратор ускорение, обеспечиваемое столом, равнялось $a = 9.3 \text{ мc}^{-2}$.

Семеноженков Владимир Степанович - Воронежский филиал МИИТ, д-р техн. наук, профессор, тел. 8(473) 246-55-45

Семеноженков Максим Владимирович - ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. 8(473) 246-55-45

Отклонение сигнала на осциллограмме равнялось 14 мм. Масштабный коэффициент при данной калибровке



1 – тахогенератор; 2, 3 – датчики циклограммы;

4 – пьезоакселерометр; 5 – избиратели пределов;

6 – тензостанция; 7 – фильтр; 8 – виброизмеритель; 9 – осциллограф

Разница в показаниях при различных способах тарировки не превысила 5 %.

Тарировка тока, потребляемого электродвигателем, осуществлялась с помощью амперметра и калиброванного источника тока.

Масштаб силы тока $\mu_Y = \frac{J}{h_y}$,

где Ј - показания амперметра,

h_Y - отклонение луча гальванометра на осциллограмме от начальной (нулевой) линии.

Сигнал с электродвигателя поступал на избиратель пределов Р010 и далее на осциллограф.

На рис. 2 приведена осциллограмма изменения тока. Видно, что во время выполнения перемещения двигатель потребляет примерно 12 Вт, и, таким образом, средняя мощность за цикл (движение – выстой) при равном времени перемещения и паузы не превышает 6 Вт.



На рис. З показана экспериментальная зависимость изменения углового ускорения во

времени. Расхождение расчетных значений, выполненных для жесткой модели устройства подачи заготовок, и опытных данных составило около 26%, что объясняется тем, что расчетные значения получены при рассмотрении модели, не учитывающей упругие свойства звеньев механизма. $\varepsilon, \varepsilon^{-2}$



Рис. 3. Угловое ускорение поворотного стола

С использованием выше описанной методики были выполнены измерения ускорений 12-и позиционного поворотного стола револьверной подачи, в которой периодичность перемещений выходного звена обеспечивалась с помощью механизма с глобоидным кулачком фирмы «Фергусон» США с делительным радиусом роликов r = 245 мм. В качестве датчика измерений использовали пьезоакселерометр КД 41, сигнал с поступал усилитель, которого на фильтр, избиратель пределов и осциллограф (рис. 1). Тарировку осуществляли двумя способами: с использованием низкочастотного генератора и электродинамического калибратора. С генератора низких частот сигнал частотой f = 79 Гц и напряжением u = 100 мВ подавался на вход интегратора и далее через фильтр (частота среза 160 Гц) на осциллограф.

Измерения осуществляли при установке датчиков на рычаге длиной 300 мм, закрепленном на выходном валу при частоте его поворотов n = 71в минуту. Эксперимент выполнили со свободным выходным валом, а также с закрепленным на нем стальным диском диаметром 1000 мм и толщиной 20 мм. Анализ осциллограмм показывает, что заложенный в конструкцию (профиль) кулачка синусоидальный закон изменения ускорения на выходном валу реализуется только в том случае, когда на нем не закреплены какие либо детали (рис. 4, график - 1). Закрепление на выходном валу поворотного стола, с указанными размерами, приводит к значительному изменению характера ускорений (рис. 4, график - 2). Величины измеренных ускорений поворотного стола многократно превышают значения, которые быть реализованы должны были 38 счет кулачка. специального профиля Основной причиной такого изменения является то, что собственная частота системы выходной вал поворотный стол намного отличается от частоты выполнения движений выходным валом.

Кинетическая энергия стола при завершении каждого движения переходит в потенциальную энергию деформации звеньев и формирование движений колебательного характера. Видно усиление осцилляции при завершении движения, когда ускорения торможения превышают значения, запрограммированные в профиле кулачка более, чем в 4 раза. Также важно отметить, что очередность пауз и их продолжительность не выполняются.



Рис. 4. Ускорение выходного вала устройства с глобоидным кулачком

Установленный закон (рис. 4, график - 1) изменения ускорений свободного выходного вала – наклонная синусоида – соответствует расчетной зависимости, заложенной в профиле кулачка. Таким образом, результаты выполненного эксперимента подтверждают правильность выбора датчика измерений и настройки аппаратуры, что обеспечило высокую точность измерений.

Измеренные величины скорости и ускорения стола шагового устройства с аккумулятором механической энергии практически совпадают с характеристиками расчетными И отличие максимальных значений скорости стола револьверной подачи составляет 8%. Циклограмма выполнения движений и остановок выходного звена в механизме с аккумулятором энергии выполняется практически без погрешностей. Двигатели испытанных устройств обеспечили высокую работоспособность устройств. Таким образом, результаты испытаний подтвердили эффективность разработанного шагового устройства аккумулятором механической с энергии.

Литература

1. Семеноженков, В.С. Обеспечение точности позиционирования стола револьверной подачи заготовок [Текст] / В.С. Семеноженков, М.В. Семеноженков. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 12. – С. 27-30.

2. Пат. № 2056261 Российская федерация, МПК В 23Q16/02. Шаговое поворотное устройство / Семеноженков В.С.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа «Упаковочные машины». - № 5025623/08; заявл. 31.07.1991; опубл. 20.03.1996, Бюл. №11. - 21 с.

3. Соколов, А.Я. Основы расчета и конструирования машин и автоматизированных производств [Текст] / А.Я. Соколов. – М.: Машиностроение, 1969. – 639 с.

Воронежский филиал Московского государственного университета путей сообщения (ВФ МИИТ) Воронежский государственный технический университет

EXPERIMENTAL RESEARCH OF OPERATING MODES OF TURRET FEED WITH ACCUMULATOR OF MECHANICAL ENERGY

V.S. Semenozhenkov, M.V. Semenozhenkov

Description of the methodology of experimental research of turret feed sheet-stamping machine and the test results had been adduced. The effectiveness of the developed design turret feed with accumulator energy was shown

Key words: feed, sensor, calibration, velocity, acceleration, power

ВОЗНИКНОВЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЕ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

В.С. Быкадор, Г.Ю. Костенко, Т.С. Бабенко

В статье приведено исследование условий возникновения автоколебаний в простейшей системе резания. Показано, что для образования автоколебаний при резании металлов достаточно наличия конкурентного взаимодействия двух факторов – запаздывания силы резания по отношению к перемещению вершины режущего инструмента и нелинейной характеристики контактного взаимодействия между обработанной поверхностью заготовки и задней поверхностью резца. В результате исследований установлена граница области существования автоколебательных движений в плоскости неуправляемых параметров системы резания

Ключевые слова: автоколебания, динамика, процесс резания, запаздывание

Введение. В ряде работ [1-3], автоколебания элементов системы «инструмент-заготовка», возникающие в процессе резания, объясняются на основе достаточно сложных механизмов взаимодействия различных элементов системы резания, что в свою очередь приводит к сложности идентификации большого количества параметров математических моделей. Но главное, возникает вопрос, на который достаточно трудно ответить, связанный с возможностью совместного проявления тех или иных гипотетических механизмов в процессе резания.

Тем не менее, в статье [4] было показано, что в системе «инструмент-заготовка», имеющей всего лишь одну степень свободы, могут возникать автоколебания её элементов. В работе [4] в качестве факторов, которые влияли на возникновение автоколебаний, были рассмотрены трение между стружкой и режущим инструментом и характеристика потери контакта между резцом и заготовкой.

В данной статье также, как и в работе [4] исследуется система «инструмент-заготовка» с одной степенью свободы, но в качестве базовых факторов, приводящих систему к автоколебаниям, рассмотрено свойство запаздывания радиальной составляющей силы резания от вариации перемещения режущего инструмента и нелинейная характеристика силы контактного взаимодействия между обработанной поверхностью заготовки и задней поверхностью резца. Так же в данной работе определены области затухающих и устойчивых колебаний в плоскости параметров системы резания.

Математическая модель. На рис. 1 показана расчетная схема системы «инструмент-заготовка», которая, как и математическая модель построена на базе следующих гипотез и ограничений:

система имеет только одну степень свободы
перемещение режущего инструмента в радиальном направлении;

Быкадор Виталий Сергеевич – ДГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: vitaly.bykador@yandex.ru Костенко Галина Юрьевна – ДГТУ, магистрант, e-mail: galinakostenko25@gmail.com Бабенко Татьяна Сергеевна – ДГТУ, аспирант, e-mail: tanya babenko 2017@mail.ru 2) учитывается радиальная составляющая силы резания, которая зависит от координаты перемещения инструмента в радиальном направлении $X_1(t)$ и может быть описана уравнением (1)

$$P(t) = \rho\left(t_p^0 - X_1(t)\right) \tag{1}$$

где ρ – жесткость процесса резания; t_p^0 – стационарное значение глубины резания;

 учитывается нелинейная характеристика силы контактного взаимодействия между обработанной поверхностью заготовки и задней поверхностью резца, которая выражается формулой (2)

$$F(t) = P_0 e^{-\frac{X_1(t)}{T_1}}$$
(2)

где P_0 – силовой коэффициент, характеризующий сопротивление перемещению резца в тело заготовки [5]; T_1 – параметр, определяющий крутизну нарастания силы, действующей на заднюю поверхность инструмента [5].

Таким образом, сила F(t) будет возрастать по мере заглубления резца в тело заготовки, причем нарастание силы F(t) происходит по экспоненциальному закону.



Рис. 1. Схема системы точения с одной степенью свободы

Уравнение (1) не учитывает свойство запаздывания силы резания P(t) от перемещения резца в радиальном направлении $X_1(t)$. Эффект запаздывания силы резания по отношению к перемещению элементов системы «инструмент-заготовка» изве-

стен достаточно давно и был описан, например в [6]. Следует отметить, что запаздывание силы резания, по отношению к перемещению, носит характер нечистого запаздывания, а сила резания нарастает по апериодическому закону по отношению к ступенчатому изменению перемещения резца в радиальном направлении. Выше описанный характер запаздывания силы P(t) от перемещения $X_1(t)$ может быть математически смоделирован системой уравнений (3) с учетом формулы (1)

$$\begin{cases} P(t) = \rho U_1(t) \\ T_2 \frac{dU_1(t)}{dt} + U_1(t) = \left(t_p^0 - X_1(t)\right) \end{cases}$$
(3)

где T_2 – постоянная времени запаздывания радиальной составляющей силы резания по отношению к перемещению резца.

Учитывая выражение (2) и систему уравнений (3), на основании известного уравнения Лагранжа IIго рода, получим систему (4) обыкновенных нелинейных, неоднородных дифференциальных уравнений, которая представляет собой математическую модель рассматриваемой системы резания металлов

$$\begin{cases} m \frac{d^2 X_1(t)}{dt^2} + h \frac{d X_1(t)}{dt} + c X_1(t) = \\ = \rho U_1(t) + P_0 e^{-\frac{X_1(t)}{T_1}} \\ T_2 \frac{d U_1(t)}{dt} + U_1(t) = \left(t_p^0 - X_1(t)\right) \end{cases}$$
(4)

где m, h, c – приведенные коэффициенты массы, диссипации и жесткости, соответственно, системы «инструмент-заготовка».

Отметим, что полученная система уравнений (4), сходна с системой, приведенной в работе [7]. Тем не менее, полученная математическая модель имеет одно существенное отличие от системы уравнений работы [7], в которой, в степень экспоненты нелинейной функции введена скорость координаты радиального перемещения режущего инструмента $\frac{dX_1}{dt}$, что физически достаточно сложно обосновать. В работе [7] не приведено физического обоснования введения скорости перемещения в функцию контактного взаимодействия поверхностей инструмента и заготовки. Рассмотрение же перемещения резца X_1 , в нелинейной функции, является естественным, и физически подтверждается на основе известных опытов с системами трения [8, 9].

Исследование устойчивости системы. Параметры системы (4) T_2 и ρ , в общем случае, являются неуправляемыми. Данные параметры могут варьироваться в процесс резания и зависят от многих факторов (температура, неоднородная структура обрабатываемого материала, формирование нароста и другие факторы). То есть изменение параметров T_2 и ρ может приводить к различным качественным изменениям траектории движения вершины резца. Поэтому представляется интерес исследовать устойчивость системы в плоскости параметров T_2 и ρ .

Следует отметить, что исследование устойчивости выполняется над линеаризованной системой. Как известно, если в нелинейной системе возможно развитие автоколебаний, то в линеаризованной системе, автоколебания выродиться в неустойчивые траектории движения. Таким образом, можно выявить множество пар значений параметров T_2 и ρ , для которых возможно, будут наблюдаться автоколебания при исследовании исходной нелинейной системы.

Линеаризованное представление системы (4), записанное в векторно-матричной форме в вариациях относительно координат стационарного состояния имеет форму (5)

$$\dot{X} = A X \tag{5}$$

где $\dot{X} = (\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{u}_1)^T$ - вектор производных координат состояния системы; A – системная матрица; $X = (x_1, x_2, u_1)^T$ - вектор координат состояния системы.

Системная матрица А будет иметь вид (6)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0\\ -\left(\frac{c + \frac{P_0}{T_1} e^{-\frac{X_1^0}{T_1}}}{m}\right) & -\frac{h}{m} & \frac{\rho}{m}\\ -\frac{1}{T_2} & 0 & -\frac{1}{T_2} \end{pmatrix}$$
(6)

где X_1^0 – координата стационарной точки позиционирования вершины резца в радиальном направлении.

Из системной матрицы (6) получим характеристическое уравнение (7)

$$a_0 \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0 \tag{7}$$

где $a_0 = mT_2; a_1 = hT_2 + m;$

$$a_2 = \left[c + \frac{P_0}{T_1} e^{-\frac{X_1^0}{T_1}}\right] T_2 + h;$$

 $a_3 = \rho + c + \frac{P_0}{T_1} e^{-\frac{X_1^0}{T_1}} -$ коэффициенты харак-

теристического уравнения.

Метод D – разбиения, который как правило используется для построения областей устойчивости, в данном случае не может быть применен, так как один из искомых параметров ρ (8) зависит от стационарной координаты X_1^0 , которая в свою очередь зависит от искомого параметра ρ , как это показано в формуле (9)

$$\rho(\omega) = -\left(c + \frac{P_0}{T_1} e^{-\frac{X_1^0}{T_1}}\right) + \omega^2 \left(m - \left(\frac{1}{c + \frac{P_0}{T_1}} e^{-\frac{X_1^0}{T_1}} - \omega^2 m\right)\right)$$
(8)

где ω – частота, $\omega \in (-\infty, +\infty)$.

$$(c+\rho)X_1^0 = \rho t_p^0 + P_0 e^{-\frac{X_1^0}{T_1}}$$
(9)

В данном случае, построение областей устойчивости, было выполнено на основе применения критерия Гурвица. Условия устойчивости по Гурвицу, для характеристического уравнения (7), имеют вид (10)

$$\begin{cases} a_{0} = mT_{2} > 0, \\ a_{3} = \rho + c + \frac{P_{0}}{T_{1}} e^{-\frac{X_{1}^{0}}{T_{1}}} > 0, \\ \Delta\Gamma_{1} = hT_{2} + m > 0, \\ \Delta\Gamma_{2} = \frac{hP_{0}T_{2}^{2}e^{-\frac{X_{1}^{0}}{T_{1}}}}{T_{1}} + chT_{2}^{2} - m\rho T_{2} + \\ +h^{2}T_{2} + hm > 0. \end{cases}$$
(10)

Задавшись значениями параметров $\rho \in [0; 200] \frac{\kappa \Gamma}{MM}$ и $T_2 \in [0; 0,1]$ с, были выполнены численные расчеты по выражениям (9) и (10) расположения областей устойчивости на плоскости « $T_2 - \rho$ » (рис. 2). Значения остальных параметров системы резания приведены в таблице.

Параметр	Значение параметра
$m, rac{\kappa \Gamma \cdot c^2}{MM}$	0,01
h, ^{кг-с} мм	0,1
$C, \frac{\kappa\Gamma}{MM}$	1000
<i>Р</i> ₀ , кг	0,1
<i>Т</i> ₁ , мм	0,1
$t_p^0,$ мм	2

Параметры системы резания



Рис. 2. Области устойчивых и неустойчивых движений линеаризованной системы в плоскости параметров « $T_2 - \rho$ »

Анализ вида областей устойчивости позволяет сказать, что изменение жесткости процесса резания $\rho \in [0; \rho_{ycr})$ независимо от значения времени запаздывания T_2 силы резания, обеспечивает однозначно устойчивое движение (линия №1 на рис. 2). Варьирование параметра T_2 при значениях $\rho < \rho_{ycr}$, так же обеспечивает однозначно только устойчивые движения системы. Но вариация параметра T_2 при значениях параметра $\rho > \rho_{ycr}$, может приводить как к устойчивым, так и неустойчивым траекториям движения системы (линия №2 на рис. 2). То есть в системе, в результате изменения состояния процесса резания, могут меняться значения параметров T_2 , ρ и тем самым приводить систему к неустойчивым траекториям движения.

Исследование автоколебаний системы. Как было отмечено выше, неустойчивые траектории движения, которые наблюдаются при анализе линеаризованной системы, при анализе исходной нелинейной системы (4) могут соответствовать как неустойчивым движениям, так и устойчивым колебаниям. Поэтому имело смысл дополнительно исследовать влияния значений параметров T_2 и ρ , из области неустойчивых движений линеаризованной системы (рис. 2), в исходной нелинейной системе (4). Было выполнено цифровое моделирование исходной нелинейной системы (4) для различных значений параметров T₂ и ρ взятых в разных точках области неустойчивых движений линеаризованной системы (рис. 2). Результаты моделирования приведены на рис. 3 и 4.



Рис. 3. Траектория движения вершины резца: a) $T_2 = 0,005$ и $\rho = 120$; б) $T_2 = 0,0075$ и $\rho = 120$



Рис. 4. Траектория движения вершины резца: а) $T_2 = 0,012$ и $\rho = 180$; б) $T_2 = 0,015$ и $\rho = 180$



Рис. 4. Траектория движения вершины резца: a) $T_2 = 0,012$ и $\rho = 180$; б) $T_2 = 0,015$ и $\rho = 180$ (продолжение)

Как можно видеть из рис. 3 и 4, область неустойчивых движений, для линеаризованной системы, в исходной нелинейной системе соответствует устойчивым колебательным движениям. Варьирование параметров T_2 и ρ процесса резания несколько изменяет вид траектории движения, но качественно траектория движения вершины резца остается без изменения и соответствует автоколебательному процессу. Автоколебательный процесс развиваться в течение некоторого времени, после чего выходит на стационарное значение амплитуды.

Выводы. Было показано, что даже элементарная система резания, имеющая одну степень свободы, в которой учитываются всего лишь два фактора - запаздывание силы резания по отношению к радиальному перемещению вершины режущего инструмента и нелинейная характеристика силы контактного взаимодействия между обработанной поверхностью заготовки и задней поверхностью резца, приводит к формированию автоколебаний в системе.

Автоколебательные процессы обусловлены конкуренцией выше названных факторов. Запаздывание силы резания по отношению к перемещению резца вызывает развитие неустойчивых колебательных траекторий движения, а нелинейная характеристика силы контактного взаимодействия приводит к ограничению развития неустойчивых колебаний, тем самым формируя незатухающие колебания.

Важно отметить так же то, что при рассмотрении математической модели, не учитывающей фактор запаздывания силы резания и фактор контактного взаимодействия, область автоколебательных движений (рис. 2), вообще бы не была найдена. Таким образом, удалось не только показать элементарный механизм образования автоколебаний в системе резания, но и выявить область образования автоколебательных движений в плоскости неуправляемых параметров T_2 и ρ .

Литература

1. Заковоротный В.Л. Один случай формирования хаотических аттракторов в динамической системе резания / В.Л. Заковоротный, А.А. Губанова, В.В. Христофорова // Вестник Донского государственного технического университета. - 2015. - Т.15. - № 2 (81). - С. 11-21.

2. Лукьянов А.Д. Анализ возможности изгибных колебаний заготовки на возникновение автоколебаний при глубоком сверлении маложестких деталей из гетерогенного материала / А.Д. Лукьянов, Т.С. Онойко, П.П. Верещетин // Вестник Донского государственного технического университета. - 2014. - Т.14. - № 1 (76). - С. 162-168.

3. Заковоротный В.Л. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В.Л. Заковоротный, Д.Т. Фам, С.Т. Нгуен, М.Н. Рыжкин // Вестник Донского государственного технического университета. - 2011. - Т.11. - № 3 (54). - С. 301-311.

4. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process / G. Litak // Chaos, Solitons and Fractals – vol. 13, - 2002, - P. 1531-1535.

5. Заковоротный В.Л. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием / В.Л. Заковоротный, Фам Динь Тунг, В.С. Быкадор // Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика». – 2014. - № 3. – С. 26-39.

6. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967, 359 с.

7. Алибаш К.Ю. Повышение эффективности точения на основе раскрытия нелинейных свойств процесса, дис. на соискание степени магистра, Ростов-на-Дону, 2015, 79 с.

 Заковоротный В.Л. Введение в динамику трибосистем / В.Л. Заковоротный, В.П. Блохин, М.И. Алексейчик. Ростов-на-Дону: ИнфоСервис, 2004. – 680 с.

9. Заковоротный В.Л. Изучение многообразий в пространстве состояния трибосистем / В.Л. Заковоротный, Н.С. Семёнова // Вестник Донского государственного технического университета. - 2005. - Т.5. - № 1. - С. 30-40.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

AN OCCURRENCE OF A SELF-OSCILLATION IN SIMPLE CUTTING SYSTEM

V.S. Bykador, G.Ju. Kostenko, T.S. Babenko

Conditions of an appearance of a self-oscillations in simple cutting system were considered in the paper. Two competing factors are delay of a cutting force and nonlinear characteristic of contact clearance face of a tool and workpiece are making the self-oscillations. We also got a self-oscillations region for two non-controlled parameters

Key words: a self-oscillations, dynamics, cutting process, a delay

К ВОПРОСУ О КИНЕТИКЕ РАЗВИТИЯ ФИЗИЧЕСКОГО КОНТАКТА ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ ТИТАНА

В.В. Пешков, А.Б. Булков, М.В. Семеноженков, С.А. Арсенов

По результатам экспериментальных исследований, выполненных на образцах из титановых сплавов ОТ4 и ВТ14 с модельными микровыступами, имитирующими шероховатость реальных поверхностей, установлено влияние высоты микровыступов на кинетику развития физического контакта при диффузионной сварке. Показано, что с увеличением высоты микровыступов уменьшается скорость развития физического контакта, что связано с деформационным упрочнением металла в зоне контакта, обусловленным локализацией напряжений и деформаций в вершинах микровыступов

Ключевые слова: диффузионная сварка, температура, давление, микровыступ, физический контакт

При диффузионной сварке металлов одним из основных условий получения соединения является формирование физического контакта, обеспечивающего сближение соединяемых поверхностей на расстояние при котором происходит образование химических связей и развитие объемного взаимодействия [1, 2].

Фактором, влияющим на кинетику развития физического контакта, является микрогеометрия свариваемых поверхностей, которая зависит от вида их финишной обработки.

Установление кинетических закономерностей влияния исходной микрогеометрии свариваемых поверхностей на развитие контакта в условиях диффузионной сварки позволяет обоснованно подходить к выбору как финишной обработки контактных поверхностей, так и технологических параметров процесса сварки (температуры, давления, времени).

В общем случае микрогеометрию поверхностей после их механической обработки можно охарактеризовать формой микровыступов, их высотой и расстоянием между ними (шагом). В работах [3-5] при анализе кинетики процесса развития физического контакта микрогеометрию контактных поверхностей моделировали в виде эквидистантно расположенных микровыступов с шагом 0,1 мм, имеющих в сечении форму равнобедренного треугольника, характеризуемого углом в между образующей и основанием. Выполненный анализ [5] показал, что с увеличением угла β от 15° до 60° при одних и тех же технологических параметрах (например, температуре 900 °С и сварочном давлении 2 МПа) время сварки, необходимое для развития физического контакта возрастает более чем в 4 раза. Однако вопрос о том, как влияет высота микровыступов (или, что тоже самое, расстояние между микровыступами) при постоянной величине угла β остается открытым.

Данная работа является продолжением ранее выполненных исследований [5], ее целью является установление закономерностей влияния высоты микровыступов на кинетику развития физического контакта в условиях диффузионной сварки.

Экспериментальные исследования проводили по методике [5] на образцах из сплава ОТ4, имеющего в исходном состоянии глобулярную микроструктуру. Контактные поверхности одной партии образцов были полированными, другой - обработанными на токарном станке и представляли собой эквидистантно расположенные микровыступы с шагом b: 0,08; 0,28, 0,5; 1,0 мм (соответственно высота выступов h: 00108; 0,0378; 0,0675; 0,135 мм). Сечение выступов представляло собой треугольник с углом между его образующей и основанием $\beta = 15^{\circ}$. Сварку образцов выполняли в изотермических условиях в интервале температур 850-950 °C при давлении 2,0 МПа, котрое прикладывалось после достижения заданной температуры. Сваренные образцы испытывали на ударный изгиб и с предварительно полированной поверхности снимали фрактограммы (рис. 1).



Рис. 1. Типичный вид фрактограммы с поверхности разрушения образов, поверхность одного из которых полированная, а другая точеная, ×150

Поскольку между высотой микровыступов h и шагом между ними b при постоянном значении угла $\beta=15^{\circ}$ существует пропорциональная зависимость ($h=tg\beta \cdot b/2$) и в процессе экспериментов более точно и просто измеряется величина шага b, то и

Пешков Владимир Владимирович - ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: <u>otsp@vorstu.ru</u>

Булков Алексей Борисович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: <u>bulkov ab@mail.ru</u>

Семеноженков Максим Владимирович – ВГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: <u>otsp@vorstu.ru</u>

Арсенов Сергей Александрович – ВГТУ, магистрант, e-mail: <u>otsp@vorstu.ru</u>

полученные результаты анализировались в зависимости от этого параметра.

По результатам экспериментальных исследований строили кинетические зависимости (рис. 2) $F_{omn} = \varphi(\tau)$, при заданной величине b ($F_{omn} = F_{\kappa}/F_{n}$, где F_{omn} - относительная площадь физического контакта; F_{κ} - площадь образовавшегося контакта; F_{n} - номинальная площадь контакта поверхности образца).

 F_{omh} определяли как среднее арифметическое результатов не менее 10-15 замеров на разных участках фрактограмм.

Из данных приведенных на рис. 2, видно, что зависимости $F_{omn} = \varphi(\tau)$ имеют затухающий характер, при этом увеличение шага между микровыступами *b* (увеличение высоты микровыступов) сопровождается уменьшением относительной площади сформировавшегося контакта, хотя с увеличением *b* усилие, приходящееся на один микровыступ пропорционально возрастает. Так в условиях эксперимента при увеличении шага от 0,08 до 1,0 мм нагрузка на микровыступ возрастает в 12,5 раз.

Наблюдаемую закономерность изменения площади контакта при изменении шага между микровыступами можно объяснить тем, что с увеличением высоты выступов происходит локализация напряжений и пластической деформации в вершинах микровыступов. Это приводит к локальному деформационному упрочнению материала в вершинах выступов, и, следовательно, к снижению величины образующегося физического контакта.

Некоторым подтверждением этого является наблюдаемое изменение микротвердости материала в зоне контакта, которая при нагрузке на индентор прибора 50 г составляла 2980 МПа при *b*=0,08 мм и 3250 МПа при *b*=1,0 мм.

Как было показано в работах [2-5] кинетическая зависимость развития физического контакта в изотермических условиях может быть описана выражением:

$$F_{om\mu} = 1 - e^{-\tau/t^*}.$$
 (1)

где t^* - эмпирическая константа, имеющая размерность времени и отражающая кинетические свойства процесса развития физического контакта (его инерционность).

После логарифмирования (1) получим выражение:

$$ln(1 - F_{om\mu}) = -\tau/t^*, \tag{2}$$

которое в координатах $ln(1-F_{omh}) - \tau$ является уравнением прямой линии.

Обработка экспериментальных данных (рис. 2) в этих координатах позволяет определить численные значения эмпирической константы *t** как котангенс угла наклона прямых к оси абсцисс в зависимости от температуры и высоты (шага) микровыступов при постоянных значениях сжимающего давления, их формы и микроструктуры свариваемых заготовок.

Зависимость константы t^* от температуры имеет нелинейный характер (рис. 3), а от шага выступов – линейный (рис. 4).



Рис. 2. Кинетика развития контакта при температурах, °C: 1 – 850; 2 – 875; 3 – 900; 4 – 925; 5 – 950; величина шага *b*, мм: а – 0,08; б – 0,28; в – 0,5; г – 1,0

Поскольку в основе образования физического контакта при сварке в условиях низкоинтенсивного силового воздействия лежит высокотемпературная ползучесть [1, 2], являющаяся термически активируемым процессом, то можно предположить что t^* является экспоненциальной функцией температуры и пропорциональна некоторому эмпирическому коэффициенту C, линейно зависящему от шага между выступами:

$$t^* = C \cdot exp(-E/RT), \tag{3}$$

где *E* – энергия активации процесса, контролирующего развитие физического контакта; *R* – газовая постоянная; *T* – температура испытания; *C* – эмпирический коэффициент, отражающий зависимость







Рис. 4. Зависимости *t**= $\phi(b)$ при температуре, °C: 1 – 850; 2 – 875; 3 – 900; 4 – 925; 5 - 950

После логарифмирования выражения (3) получим:

$$ln t^* = ln C - E/(RT), \tag{4}$$

Построение зависимостей $ln t^* = \varphi(1/T)$ позволяет определить численные значения E и C и найти аналитическое выражение (3).

Значения t^* (приведенные на рис. 3, 4) в координатах $ln t^* - 1/T$ ложатся на прямые линии (рис. 5) из угла наклона которых следует, что значения эффективной энергии активации процессов, контролирующих развитие физического контакта в наших экспериментах практически не зависят от шага между микровыступами на контактных поверхностях и составляет 235 кДж/моль. Найденное значение Eблизко к значению энергии активации высокотемпературной ползучести сплава ОТ4, имеющего в исходном состоянии мелкозернистую структуру в интервале температур ниже окончания $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ – превращения, которое составляет 230 кДж/моль [1].



Рис. 5. Зависимости $ln t^* - 1/T$. Обозначения соответствуют рисунку 3

На рис. 6 приведена зависимость $C=\varphi(b)$, которую можно аппроксимировать уравнением прямой линии



Приведенные результаты позволяют получить для сплава ОТ4 аналитическое выражение, отражающее связь эмпирической константы t^* с микрогеометрией контактных поверхностей (характеризуемой шагом *b* между микровыступами) и температурой в изотермических условиях диффузионной сварки при сжимающем давлении *p*=2,0 МПа, использованном в эксперименте

$$t^{*}=(1,1+2,7\cdot b)\cdot 10^{-9}\cdot exp(-28506/T).$$
 (6)

Если считать, что зависимость $t^* \sim p^{-1,2}$ [2] будет справедлива и в рассматриваемом случае, то выражение (6) можно представить в более общем виде:

$$t^{*}=(2,53+6,2\cdot b)\cdot 10^{-9} \cdot p^{-1,2} \cdot exp(-28506/T).$$
 (7)

Учитывая приведенную выше зависимость между шагом и высотой микровыступов выражение (7) можно представить в виде зависимости $t^{*=}\varphi(h)$

$$t^* = (2,53+46,3\cdot h) \cdot 10^{-9} \cdot p^{-1,2} \cdot exp(-28506/T).$$
 (8

Используя выражение (8) можно дать количественную оценку наблюдаемому деформационному упрочнению материала в зависимости от высоты микровыступов, определив его как отношение

 $k_{ynp} = t^*/t_o^*$, где t_o^* - значение константы при h=0. Тогла

$$k_{vnp} = 1 + 18, 3 \cdot h,$$
 (9)

т.е. при увеличении высоты микровыступов в 12,5 раз от 0,0108 до 0,135 мм скорость развития физического контакта, обратно пропорциональная t^* [2] уменьшается в 2,9 раза.

Аналогичные исследования, выполненные на сплаве BT14 с исходной глобулярной микроструктурой, показали, что эмпирическая константа *t** для этого сплава с учетом высоты микровыступов на контактных поверхностях может быть оценена по выражению:

$$t^{*}=(1,38+29,9\cdot h)\cdot 10^{-8} \cdot p^{-1,2} \cdot exp(-26582/T).$$
 (10)

выводы

1. Проведенные исследования показали, что в качестве интегральной характеристики процесса развития контакта между соединяемыми заготовками в условиях диффузионной сварки можно использовать некоторую постоянную *t**, имеющую размерность времени и отражающую кинетические свойства процесса.

2. С увеличением высоты микровыступов при постоянном угле между его образующей и основанием величина *t** возрастает (увеличивается время, необходимое для образования физического контакта), что обусловлено локальным деформационным упрочнением материала в вершинах выступов.

3. Путем аппроксимации результатов расчета получены выражения для оценки коэффициента упрочнения материала свариваемых заготовок в зависимости от высоты микровыступов.

Литература

1. Диффузионная сварка титана [Текст] / Э.С. Каракозов, Л.М. Орлова, В.В. Пешков, В.И. Григорьевский. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.

 Диффузионная сварка титановых слоистых конструкций аэрокосмической техники [Текст] / В.В. Пешков, А.Б. Булков, И.Л. Батаронов и др.; под ред. В.С. Рачука. – Воронеж: ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет". – 2012. – 312 с.
3. Моделирование процесса развития физическо-

3. Моделирование процесса развития физического контакта при высокотемпературной термодеформационной обработке титана [Текст] / В.В. Пешков, С.В. Сафонов, А.Б. Булков, В.Р. Петренко, Д.Н. Балбеков, Л.С. Киреев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, №5. – С. 108–114.

4. Кинетика развития физического контакта при диффузионной сварке титана [Текст] / А.Б. Булков, Д.Н. Балбеков, В.В. Пешков, А.И. Стрыгин // Сварочное производство. – 2013. – №10. – С. 20-27.

5. Влияние микрогеометрии поверхности на кинетику развития контакта при диффузионной сварке титана [Текст] / А.Б. Булков, С.В. Сафонов, Д.Н. Балбеков, В.Р. Петренко, В.В. Пешков // Технология машиностроения. – 2013. – № 2. – С. 14-19.

Воронежский государственный технический университет

FOR THE KINETICS OF DEVELOPMENT OF PHYSICAL CONTACT WHEN DIFFUSION BONDING OF TITANIUM

V.V. Peshkov, A.B. Bulkov, M.V. Semenozhenkov, S.A. Arsenov

According to the results of experimental studies carried out on samples of titanium alloy VT14 and OT4 microprojection with model simulating the roughness of real surfaces, set the height of the microprojections influence on the kinetics of physical contact with the diffusion bonding. It is shown that an increase in the height of the microprojections decreases the speed of the physical contact, which is associated with deformation hardening of metal in the contact zone, due to localized stresses and strains in the tops of the microprojections

Key words: diffusion bonding, temperature, pressure, microprojection, physical contact